

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et génie civil

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Construction

PERFORMANCE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE SABLE DE CONCASSAGE

Par

Smain BENYAMINA

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------|------|------------------------|-----------------------|
| K. GRINE | Prof | U. de Blida 1 | Président |
| F. DEBIEB | Prof | U. de Médéa | Examineur |
| O. BOUKENDAKDJI | Prof | U. de Médéa | Examineur |
| K. ALI BENYAHIA | MC-A | U. de Khemis Miliana | Examineur |
| B. MENADI | Prof | U. de Blida 1 | Directeur de thèse |
| S. KENAI | Prof | U. de Blida 1 | Co-directeur de thèse |
| S. KAMALI BERNARD | Prof | INSA de Rennes, France | Invitée |

Blida, 2019

ملخص

الخرسانة المرصوصة ذاتيا هي عبارة عن خرسانة ذات سيولة عالية حيث تستطيع اخذ مكانها بدون رج داخلي او خارجي. طريقة تحضيرها تتطلب نسبة هائلة من المواد العالية الرقة وذلك لتجنب ظاهرة عدم تماسكها وتجانسها. ان استعمال الرمل المسحوق والغني بالمساحيق الكلسية الناعمة في انتاج الخرسانة المرصوصة ذاتيا يعتبر حلا اقتصاديا وبيئيا مناسباً. تهدف هذه الدراسة الي تقييم مدي تأثير الحبيبات الكلسية الناعمة الناتجة من مسحوق الرمال على الخصائص الريولوجية، الميكانيكية وديمومة الخرسانة المرصوصة ذاتيا.

لهذا الغرض لقد تم تحضير خمسة عينات من الخرسانة المرصوصة ذاتيا، وذلك بالتعويض الجزئي للرمل المسحوق بنسب تتراوح بين: 0%، 5%، 10%، 15%، و 20% من المسحوق الناعم الكلسي. حيث تم تثبيت نسبة الماء\الاسمنت الي 0.4 وتركيز الاسمنت الي 490 كلغ/م³.

لقد تم اختبار عينات الخرسانة في الحالة الطازجة بواسطة قياس مستوي الانتشار ووقت التدفق ونسبة الاستقرار على مستوي الغريال إضافة الي تحديد المعاملات الريولوجية بواسطة ريوميتر، كما تم اختبار الخرسانة في الحالة الصلبة وذلك بتحديد مقاومة الضغط والشد بواسطة الانحناء، فيما يخص الديمومة أجريت تجارب المسامية الكلية امتصاص الماء الشعري ونفاذية ايونات الكلور.

اثبتت النتائج المحصل عليها على مساهمة الرمال المكسرة في تحسين الخصائص الريولوجية للخرسانة حيث ان نسبة من الرقائق الكلسية تتراوح بين 0 و 20% في الرمال المسحوقة يمكن ان تساهم في تماسك و تجانس الخرسانة. كما انها ساعدت في ارتفاع قوي الضغط والشد في المدي القريب وانخفاضه المحسوس في مدة 28 يوما. ان ادراج جزيئات الحجر الجيري الناعم كبديل للرمل المسحوق يقلل من الامتصاص الشعري للمياه وتنقل ايونات الكلوريد وبالتالي تحسين أداء المتانة.

الكلمات المفتاحية: الرمل المسحوق، الحبيبات الكلسية الناعمة، الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الخصائص الريولوجية، الخصائص الميكانيكية، المسامية الكلية، امتصاص الماء الشعري، ونفاذية ايونات الكلور.

RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides qui peuvent s'écouler sans aucune vibration. Leur composition nécessite une grande quantité de fines afin de limiter les risques de ressuage et de ségrégation. L'utilisation du sable concassé (SC) riche en fines calcaires (FC) peut être considérée comme une solution adéquate pour des raisons économiques et environnementales. Cette étude traite l'influence des fines calcaires issues du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du BAP.

A cette effet, cinq mélanges de BAP, en remplaçant partiellement le sable de concassage par 0%, 5%, 10%, 15% et 20 % par des fines calcaires, ont été préparés avec un rapport eau / ciment constant de 0,40 et un dosage en ciment de 490 kg/m³. Des essais à l'état frais ont été réalisés à l'aide des essais de l'étalement, le temps d'écoulement en entonnoir en V, l'essai à la boîte en L (L-Box), l'essai de la stabilité de tamisage et l'essai au rhéomètre. Les résistances à la compression et à la flexion des mélanges de BAP ont été évaluées. En ce qui concerne les propriétés de durabilité, la porosité totale, l'absorption capillaire de l'eau et la migration des ions de chlorures ont été également étudiées à 180 jours. Pour les deux modes de test à l'état frais, les résultats indiquent une compatibilité entre étalement / seuil de cisaillement (τ_0) et temps d'écoulement Tv-funnel / viscosité plastique (μ).

L'augmentation de la teneur de fines calcaires dans les mélanges de BAP contribue à la diminution de l'étalement et du seuil de cisaillement. Tous les mélanges de BAP étudiés ont obtenu un taux de remplissage adéquat, une capacité de passage adéquate et ne présentent aucune ségrégation. Aux premiers âges, les résistances à la compression et à la flexion ont été améliorées avec l'augmentation de la quantité des fines calcaires. Cependant, à 28 jours, les deux résistances mécaniques ont été légèrement réduites avec l'augmentation de la quantité des fines calcaires. De plus, l'inclusion des particules de fines calcaires en tant que substitution de sable concassé réduit l'absorption capillaire de l'eau, la migration des ions chlorure et améliore par conséquent les performances de durabilité.

Mots-clés : sable de concassage, fines calcaires, béton autoplaçant, rhéologie, résistance, perméabilité à l'eau, migration des ions de chlorures.

ABSTRACT

Self-compacting concretes (SCC) are highly fluid concrete which can flow without any vibration. Their composition requires a large quantity of fines to limit the risk of bleeding and segregation. The use of crushed sand rich in limestone fines could be an adequate solution for both economic and environmental reasons. This work investigates the influence of quarry limestone fines from manufactured crushed sand on rheological, mechanical and durability properties of SCC.

For this purpose, five mixtures of SCC with different limestone fines content as substitution of crushed sand (0, 5, 10, 15 and 20%) were prepared with constant water-to-cement ratio of 0.40 and 490 kg/m³ of cement content. Fresh SCC mixtures were tested by slump flow test, V-funnel flow time test, L-box height ratio, segregation resistance and rheological test using a rheometer. Compressive and flexural strengths of SCC mixtures were evaluated at 28 days. Regarding durability properties, total porosity, capillary water absorption and chloride-ion migration were studied at 180 days. For the two test modes in fresh state, the results indicated compatibility between slump flow/yield stress (τ_0) and V-funnel flow time/plastic viscosity (μ).

Increasing the substitution level of limestone fines in SCC mixtures, contributes to the decrease of the slump flow and the yield stress. All SCC mixtures investigated achieved adequate filling, adequate passing ability and exhibit no segregation. At early ages, the compressive and flexural strengths were improved with the increase of limestone amount. However, at 28 days, both strengths were slightly reduced with the increase of limestone amount. Moreover, the inclusion of limestone fines as crushed sand substitution reduces the capillary water absorption, chloride-ion migration and consequently enhances the durability performance.

Keywords: crushed sand, limestone fines, self-compacting concrete, rheology, strength, water permeability, capillary water absorption, chloride-ion migration.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu Dieu le miséricordieux qui nous a donné du courage et de la volonté avec lesquels cette thèse a été achevée.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Belkacem MENADI Professeur à l'Université de Blida 1, département de génie civil, pour avoir dirigé ce travail de recherche. Je lui exprime ici mon profond respect et ma grande gratitude.

Je voudrais également exprimer mes remerciements à ma co-directrice de thèse Madame Siham KAMALI BERNARD Professeur à INSA de Rennes (France) pour m'avoir accueilli et aidé à réaliser une partie de l'étude expérimentale au laboratoire LGCGM (Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique). Ses précieux conseils m'ont été d'un grand apport.

Je suis également très reconnaissant à Monsieur Kenai Said, Professeur à l'Université de Blida 1 pour son aide, ses conseils et sa disponibilité.

Mes remerciements vont à Monsieur Khaled GRINE Professeur à l'Université de Blida-1, à Monsieur Farid DEBIEB Professeur à l'Université de Médéa, à Monsieur Otmane BOUKENDAKDJI Professeur à l'Université de Médéa, et à Monsieur Khouja ALI BENYAHIA Maître de Conférence à l'Université de Khemis Miliana, qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Enfin, je remercie l'équipe du laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux à l'Université du Blida 1, l'équipe de génie civil de l'université de Médéa, et l'équipe du laboratoire de génie civil et génie mécanique (LGCGM) à INSA de Rennes, France, pour m'avoir ouvert les portes du laboratoire pour réaliser mes essais.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| ملخص | 1 |
| Résumé | 2 |
| Abstract | 3 |
| Remerciements | 4 |
| Table des matières | 5 |
| Liste des tableaux | 8 |
| Liste des figures | 9 |
| Liste des illustrations et des abréviations | 13 |
| Introduction générale | 16 |
| CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS AUTOPLACANT | 18 |
| 1.1 Introduction | 18 |
| 1.2 Généralités sur les bétons autoplaçants (BAP) | 18 |
| 1.3 Avantages des BAP | 19 |
| 1.3.1 Avantages techniques | 19 |
| 1.3.2 Avantages socio-économiques | 19 |
| 1.4 Les différents constituants d'un BAP | 20 |
| 1.4.1 Le ciment | 20 |
| 1.4.2 Les granulats | 22 |
| 1.4.3 L'eau de gâchage | 28 |
| 1.4.4 Les fines (Ajouts minéraux) | 29 |
| 1.4.5 Les superplastifiants | 34 |
| 1.4.6 Les agents de viscosité | 35 |
| 1.5 Méthodes de formulation des bétons autoplaçants | 36 |
| 1.5.1 Méthode japonaise (Optimisation du volume du mortier) | 36 |
| 1.5.2 Méthode suédoise (Optimisation du volume de la pâte) | 38 |
| 1.5.3 Méthode Française (LCPC) (optimisation du squelette granulaire) | 38 |
| 1.5.4 Approche de l'AFGC (Association Française de Génie Civil) | 38 |
| 1.6 Caractérisation des bétons autoplaçants | 39 |
| 1.6.1 Propriétés des BAP à l'état frais | 39 |
| 1.6.2 Caractérisation des BAP à l'état frais | 41 |
| 1.6.3 Rhéologie des bétons autoplaçants | 45 |
| 1.7 Propriétés des BAP à l'état durci | 51 |

| | |
|---|------------|
| 1.7.1 Propriétés mécaniques | 52 |
| 1.8 Conclusion | 57 |
| CHAPITRE 2 : SABLE DE CONCASSAGE ET DURABILITE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE SABLE DE CONCASSAGE | 58 |
| 2.1 Introduction | 58 |
| 2.2 Notions générales sur le sable de concassage | 58 |
| 2.3 Emploi du sable de concassage dans la confection du béton autoplaçant | 60 |
| 2.4 Effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton | 61 |
| 2.5 Influence du sable de concassage sur les propriétés mécaniques du béton | 68 |
| 2.6 Durabilité des BAP à base de sable de concassage | 72 |
| 2.6.1 Perméabilité à l'eau | 73 |
| 2.6.2 Absorption d'eau | 74 |
| 2.6.3 Perméabilité aux gaz | 75 |
| 2.6.4 Diffusions des ions de chlorure | 77 |
| 2.6.5 Carbonatation | 81 |
| 2.6.6 Résistance au gel-dégel | 85 |
| 2.6.7 Résistance aux sulfates | 87 |
| 2.7 Conclusion | 87 |
| CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX ET ESSAIS | 88 |
| 3.1 Introduction | 88 |
| 3.2 Caractéristiques des matériaux utilisés | 88 |
| 3.3 Formulation des BAP | 93 |
| 3.4 Essais effectués sur le mortier autoplaçant | 99 |
| 3.5 Essais effectués sur BAP à l'état frais | 101 |
| 3.6 Préparation et conservation des éprouvettes | 107 |
| 3.7 Essais effectués sur BAP à l'état durci | 108 |
| 3.8 Récapitulatif des essais | 113 |
| 3.9 Conclusion | 113 |
| CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS | 115 |
| 4.1 Introduction | 115 |
| 4.2 Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M) | 115 |
| 4.3 Effet du taux de substitution des SC par des FC sur l'ouvrabilité des BAP | 118 |
| 4.3.1 Etalement et temps d'écoulement T_v -funnel et T500 au cône d'Abrams | 120 |
| 4.3.2 Mesure du rapport (H2/H1) de l'essai de la boîte en L (L-Box) | 122 |
| 4.3.3 Résistance à la ségrégation | 123 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.4 Relation entre Tv-funnel et T500 | 124 |
| 4.3.5 Perte d'ouvrabilité | 125 |
| 4.4 Effet des fines calcaires sur la rhéologie des BAP | 126 |
| 4.4.1 Relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement | 126 |
| 4.4.2 Seuil de cisaillement | 128 |
| 4.4.3 Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement | 129 |
| 4.4.4 Viscosité plastique | 129 |
| 4.4.5 Corrélation entre le temps d'écoulement Tv-funnel et la viscosité plastique | 131 |
| 4.5. Effet des fines calcaires sur les BAP à l'état durci | 131 |
| 4.5.1 Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des BAP | 131 |
| 4.5.2. Effet des fines calcaires sur la résistance à la traction par flexion des BAP | 134 |
| 4.5.3 Effet des fines calcaires sur l'absorption capillaire des BAP | 134 |
| 4.5.4 Effet des fines calcaires sur la porosité accessible des BAP | 135 |
| 4.5.5 Effet des fines calcaires sur la diffusion des ions de chlorures des BAP | 136 |
| 4.5.6 Corrélation entre la résistance à la compression et le coefficient de diffusion | 138 |
| 4.6 Conclusion | 139 |
| Conclusion générale | 140 |
| Recommandations et perspectives | 142 |
| Références bibliographiques | 144 |
| Annexe A | 161 |
| Annexe B | 164 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Chaleur d'hydratation de la pâte de ciment déterminée par conduction calorimétrie. | 21 |
| Figure 1.2 : Processus d'hydratation d'une pâte de ciment Portland hydraté. | 22 |
| Figure 1.3 : Propriétés des BAP avec différents types de sable. | 23 |
| Figure 1.4 : Effet de module de finesse du sable sur l'étalement du BAP. | 23 |
| Figure 1.5 : Effet de module de finesse du sable sur la capacité de remplissage. | 24 |
| Figure 1.6 : Effet de volume du sable sur la capacité de remplissage en U-box. | 24 |
| Figure 1.7 : Effet de volume du sable sur la demande en eau du mortier | 25 |
| Figure 1.8 : Effet de sable de dunes sur : (a) le temps d'écoulement au V-funnel et (b) la viscosité d'un béton de sable fluide. | 26 |
| Figure 1.10 : Résultats empiriques des mesures d'affaissement et d'étalement au cône d'Abrams et de longueurs d'écoulement à la boîte LCPC. | 27 |
| Figure 1.11 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du rapport G/S. | 28 |
| Figure 1.12 : Influence du taux de remplacement par la fumée de silice (FS) sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment. | 30 |
| Figure 1.13 : Effet du diamètre moyen des CV sur les propriétés rhéologiques des | 31 |
| Figure 1.14 : Influence du taux de remplacement par le laitier de haut fourneau (L) sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment. | 32 |
| Figure 1.15 : Fluidité en fonction de superplastifiant. | 34 |
| Figure 1.16 : Dispersion des grains de ciment par l'ajout du superplastifiant. | 35 |
| Figure 1.17 : Propriétés du béton optimisé pour différents teneurs en agent de | 35 |
| Figure 1.18 : Dimensions des appareils utilisés pour le mortier. | 37 |
| Figure 1.19 : Schéma de l'essai d'étalement au cône (Slump Flow). | 41 |
| Figure 1.20 : L'essai de V-funnel. | 42 |
| Figure 1.21 : Dimensions de la boîte en L. | 44 |
| Figure 1.22 : Essai de stabilité au tamis. | 45 |
| Figure 1.23 : Schéma représentatif d'un fluide modèle. | 45 |
| Figure 1.24 : Différents comportements rhéologiques des fluides. | 47 |
| Figure 1.25 : Comportement rhéologique du béton. | 48 |
| Figure 1.26 : Rhéomètres « Two-point-test » et « IBB » de gauche à droite. | 49 |
| Figure 1.27 : Rhéomètres « BML » et « Cemagref » de gauche à droite. | 50 |
| Figure 1.28 : Rhéomètre BTRHEOM. | 51 |
| Figure 1.29 : Corrélation entre Tv-funnel (T500) et la viscosité plastique (a). Etalement au seuil de cisaillement (b). | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure 1.30 : L'effet des fines sur l'évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un béton ordinaire (REF). | 52 |
| Figure 1.31 : Retrait plastique (comparaison entre BAP et BO). | 54 |
| Figure 1.32 : Retrait plastique des BA et BV. | 54 |
| Figure 1.33 : Retrait endogène des BA et BV. | 55 |
| Figure 1.34 : Retrait de dessiccation des BA et BO. | 56 |
| Figure 1.35 : Déformations différées pour des bétons de résistance supérieure à 40 | 57 |
| Figure 2.1 : Développement de la production du sable de concassage en Algérie. | 59 |
| Figure 2.2 : Production des sables de concassage par secteur. | 59 |
| Figure 2.3 : Effet de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines. | 61 |
| Figure 2.4 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité en fonction de la teneur en fines dans le sable | 62 |
| Figure 2.5 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant. | 62 |
| Figure 2.6 : Evolution des propriétés rhéologiques en fonction de la surface spécifique et de teneur en fines. | 63 |
| Figure 2.7 : Evolution de a) l'étalement b) la viscosité et c) le seuil de cisaillement en fonction de la surface spécifique | 64 |
| Figure 2.8 : Effet des taux de fines sur l'ouvrabilité du BHP. | 65 |
| Figure 2.9 : 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). | 66 |
| Figure 2.10 : Influence des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques des mortiers. | 67 |
| Figure 2.11 : Effet des fines calcaires sur le comportement l'ouvrabilité du BAP. | 68 |
| Figure 2.12 : Effet de la teneur des fines sur les performances mécaniques des bétons. | 69 |
| Figure 2.13 : Relation entre la résistance à la compression du béton et la résistance du mortier. | 70 |
| Figure 2.14 : Résistance à la compression en fonction du % de LF comme remplacement partiel du sable de concassage. | 71 |
| Figure 2.15 : Résistance à la compression en fonction du % de LF comme remplacement partiel du ciment. | 71 |
| Figure 2.16 : Effet de la pâte sur les propriétés mécaniques et physiques du BAP. | 72 |
| Figure 2.17 : Perméabilité à l'eau en fonction du taux de fines calcaires. | 73 |
| Figure 2.18 : Effet de la teneur des fines sur l'absorption d'eau pour les mélanges de BAP. a):remplacement du SC par LF, b) remplace du ciment par LF. | 74 |
| Figure 2.19 : Comparaison entre l'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés selon. | 75 |
| Figure 2.20 : Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants. | 76 |
| Figure 2.21 : Comparaison de la perméabilité au gaz entre un BAP et BV. | 76 |
| Figure 2.22 : Perméabilité aux gaz des BAP en fonction du Taux de fines calcaires. | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figure 2.23 : Pénétration des ions de chlorure des bétons avec cure humide et à l'air | 83 |
| Figure 2.24 : Pénétration des ions de chlorures en fonction du taux de fines calcaires. | 80 |
| Figure 2.25 : Coefficient de migration des ions de chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants. | 80 |
| Figure 2.26 : Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C. | 81 |
| Figure 2.27 : Profondeur de carbonatation d'un BAP et d'un BV après 9 mois. | 82 |
| Figure 2.28 : L'influence du taux de calcaire sur la corrosion. | 82 |
| Figure 2.29 : L'influence du taux de calcaire sur la corrosion. | 84 |
| Figure 2.30 : Expansion des éprouvettes de mortier de BAP équivalent après 9 mois d'immersion dans la solution 5% Na ₂ SO ₄ . | 85 |
| Figure 2.31 : Variation de la masse après immersion dans la solution de 18 g/l de sulfate de sodium (Na ₂ SO ₄). | 86 |
| Figure 3.1 : Texture et forme des particules des deux sables. | 89 |
| Figure 3.2 : Diffractogramme de rayons X du sable de concassage. | 90 |
| Figure 3.3 : Courbes granulométriques des sables utilisés. | 90 |
| Figure 3.4 : DRX de fines calcaires. | 91 |
| Figure 3.5 : Courbe Granulo-lazer des fines calcaires. | 92 |
| Figure 3.6 : Courbe granulométrique du gravier 8/15 et 3/8. | 92 |
| Figure 3.7 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant. | 96 |
| Figure 3.8 : Séquence du malaxage du béton autoplaçant. | 98 |
| Figure 3.9 : Essai d'étalement pour mortier autoplaçant. | 100 |
| Figure 3.10 : Essai à l'entonnoir en V pour mortier. | 100 |
| Figure 3.11 : Dispositif de l'essai et mesure de l'étalement. | 101 |
| Figure 3.12 : Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel). | 103 |
| Figure 3.13 : Appareil de la boîte en L. | 104 |
| Figure 3.14 : Essai au tamis. | 105 |
| Figure 3.15 : Rhéomètre et leurs composants. | 106 |
| Figure 3.16 : Profil de vitesse. | 107 |
| Figure 3.17 : Conservation des éprouvettes. | 107 |
| Figure 3.18 : Essai à la compression du béton. | 108 |
| Figure 3.19 : Essai de traction par flexion. | 109 |
| Figure 3.20 : Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points. | 109 |
| Figure 3.21 : Essais de porosité accessible à l'eau. | 110 |
| Figure 3.22 : Essai d'absorption capillaire. | 111 |
| Figure 3.23 : Essai de la diffusion des ions de chlorures. | 113 |
| Figure 3.24 : Organigramme des essais réalisés. | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.1 : Etalement, temps d'écoulement Tv-funnel en fonction de la teneur en fines de calcaire. | 120 |
| Figure 4.2 : T500 en fonction de la teneur en fines. | 121 |
| Figure 4.3 : Variation du rapport H2/H1 en fonction du % de fines calcaires. | 122 |
| Figure 4.4 : Résistance à la ségrégation en fonction de la teneur en fines. | 124 |
| Figure 4.5 : Corrélation entre le temps d'écoulement Tv-Funnel et T500. | 125 |
| Figure 4.6 : Corrélation entre le temps d'écoulement Tv-funnel et T500. | 126 |
| Figure 4.7 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement. | 127 |
| Figure 4.8 : Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement en fonction des fines calcaires. | 128 |
| Figure 4.9 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement. | 129 |
| Figure 4.10 : Variation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement Tv-funnel. | 130 |
| Figure 4.11 : Corrélation entre temps d'écoulement et viscosité plastique du BAP. | 131 |
| Figure 4.12 : Relation entre la résistance à la compression et la teneur en FC. | 132 |
| Figure 4.13 : Variation de la résistance à la traction par flexion du BAP en fonction du taux de fines calcaires dans le sable de concassage. | 133 |
| Figure 4.14 : Absorption d'eau par capillarité des différents mélanges de BAP. | 135 |
| Figure 4.15 : Porosité accessible à l'eau en fonction du taux de fines calcaires. | 136 |
| Figure 4.16 : Diffusion des ions de chlorure en fonction du taux de fines calcaires. | 138 |
| Figure 4.17 : Corrélation entre la résistance à la compression et la diffusion des ions de chlorure. | 138 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1.1 : Viscosité plastique en fonction du type de matériaux. | 46 |
| Tableau 1.2 : Seuil de cisaillement en fonction du type de matériaux. | 47 |
| Tableau 2.1 : Expansion et perte de masse de BAP après 24 mois d'immersion dans la solution Na ₂ SO ₄ , l'eau de mer et l'eau distillée. | 86 |
| Tableau 3.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé. | 88 |
| Tableau 3.2 : Composition chimique et minéralogique du sable de concassage. | 89 |
| Tableau 3.3 : Composition chimique des fines calcaires. | 91 |
| Tableau 3.4 : Classification des BAP selon domaine d'application. | 102 |
| Tableau 4.1 : Résultats d'optimisation du mortier autoplaçant. | 116 |
| Tableau 4.2 : Compositions des mélanges de BAP. | 118 |
| Tableau 4.3 : Valeurs limites des essais du BAP. | 119 |
| Tableau 4.4 : Résultats récapitulatifs des essais d'ouvrabilité. | 119 |

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

| | |
|--------------------|--|
| AbG | Coefficient d'absorption du gravier |
| Abs | Coefficient d'absorption du sable |
| BAP | Béton autoplaçant |
| BAPR | Béton autoplaçant de référence |
| BHP | Béton de Haute Performance |
| BO | Béton ordinaire |
| BV | Béton Vibré |
| C | Ciment |
| C+A | Ciment+Addition |
| Ca CO ₃ | Carbonate de calcium |
| CEM I 42,5 | Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5 |
| CEM II | Ciment Portland composé |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone |
| C-S-H | Silicate de calcium hydraté |
| CV | Cendres volantes |
| Dmax | Diamètre maximal des Granulats |
| E | Eau |
| E/(C+A) | Eau / (Ciment +Addition) |
| E/C | Eau/Ciment |
| E/L | Eau/Liant |
| Evol | Le pourcentage d'eau en volume, (%) |
| FA | Fumée de silice |
| G | Gravier |
| G/S | Gravier/Sable |

| | |
|-----------------|---|
| LCPC | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées |
| MBE | Mortier de Béton Equivalent |
| MK | Métakaolin |
| MOR | Mortier |
| PC | Polycarboxylate |
| PZN | Pouzzolane naturelle |
| REF | Référence |
| Rm | Vitesse relative |
| S/M | Sable/Mortier |
| SCC | Self-Compacting Concrete |
| SF | Slump flow |
| SP | Superplastifiant |
| SP/L | Superplastifiant/Liant |
| SP/P | Superplastifiant/Poudre |
| SSB | Surface Spécifique de Blaine |
| T20 | Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm (sec) |
| T40 | Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm (sec) |
| T50 | Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec). |
| TVF | Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec). |
| V | Volume (m ³) |
| Vsable/Vmortier | Volume du sable /volume du mortier |
| γ | Taux de cisaillement, (s ⁻¹) |
| η | Viscosité, (Pa.s) |
| η_p | Viscosité plastique, (Pa.s) |

| | |
|----------------|---|
| ρ_{abs} | Masse volumique absolue, (kg/m ³) |
| ρ_{app} | Masse volumique apparente, (kg/m ³) |
| ρ_C | Masse volumique du ciment, (kg/m ³) |
| ρ_E | Masse volumique d'eau, (kg/m ³) |
| ρ_G | Masse apparente du gravier, (kg/m ³) |
| ρ_S | Masse volumique du sable, (kg/m ³) |
| ρ_{SP} | Masse volumique du superplastifiant, (kg/m ³) |
| τ | Contrainte de cisaillement, (Pa) |
| τ_0 | Seuil de cisaillement, (Pa) |
| Π | Pourcentage de laitance, (%) |
| T | Température (°C) |
| HR | Humidité (%) |
| LCPC | Laboratoire central des ponts et chaussées |
| OPC | Ordinary Portland cement |
| H2/H1 | Rapport de L-Box |
| dS | Surface élémentaire d'une couche cisillée |
| dF | Projection de la force de frottement tangentielle |
| R ² | Coefficient de corrélation |
| SC | Sable de concassage |
| FC | Filler de calcaire |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés mondialement dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Il se caractérise par sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité et son faible coût. En revanche, l'évolution des exigences des intervenants dans un projet de construction comme la durabilité du béton, le coût et le temps de mise en œuvre, tout en assurant une sécurité sans faille se traduit par l'utilisation de béton à rhéologie contrôlée conduisant à des résistances importantes. Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP). Ces nouveaux bétons ont répondu à ces nouvelles exigences, et en matière de recherche, comme maîtrise de la composition du béton en termes de maniabilité et résistances souhaitées en termes de durabilité. Du point de vue maniabilité, on entend par bétons fluides ceux qui peuvent être mis en œuvre sans vibration, il s'agit des bétons autoplaçants. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'Université de Tokyo vers les années 1980. Ce sont des bétons très fluides qui se mettent en place sans aucun apport de vibration, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraiillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. Leur formulation nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait la spécificité de cette nouvelle génération de bétons. Donc une quantité de fines (particules inférieures à 80 microns) est obligatoire pour formuler un BAP sans ségrégation et /ou ressuage.

En Algérie, ils existent environ plus de 1010 carrières avec une capacité de production annuelle totale de 68 millions de tonnes, dont plus de 15 millions de tonnes de sable de concassage comme sous-produit. Ce sable n'est utilisé que partiellement dans la construction des routes et rarement dans le béton, provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières et, par conséquent, une exploitation anarchique des sables de mer, des sablières et des ballastières provoquant un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement. La raison principale de la non utilisation de ce sable dans le béton est son taux élevé en fines (éléments inférieurs à 80 microns) qui varie de 8 à 30%. Plusieurs pays dans le monde tels que la France, l'Espagne, l'Angleterre, l'Argentine et le Maroc rencontrent le même problème dans certaines régions et, c'est pourquoi, des programmes de recherches ont été menés pour l'utilisation des sables de

concassage dans la fabrication des bétons. Ces études ont conduit ces pays à amender leurs normes et en particulier la majoration du taux de fines admissibles qui passe de 12 à 16 %. Parallèlement à cette situation, l'utilisation des sables de concassage riche en fines calcaires dans la confection des bétons autoplaçants s'avère une solution adéquate à cette problématique.

Le but principal de ce travail est la valorisation des matériaux locaux, notamment le sable de concassage, par l'étude de l'influence des fines calcaires issues du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du BAP. Le sable de concassage provenant de la carrière d'El-Hachimia (Algérie) a été tamisé pour le séparer des fines et a servi à la confection des mélanges de bétons autoplaçants. A cet effet, cinq mélanges de BAP, en remplaçant partiellement le sable de concassage par 0%, 5%, 10%, 15% et 20 % par des fines calcaires, seront préparés. L'effet des fines sur l'ouvrabilité, la rhéologie, la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion sur les mélanges de BAP sera étudié. La durabilité sera également analysée sur la base des essais de perméabilité à l'eau, d'absorption capillaire et la diffusion des ions de chlorures.

Après une introduction générale, cette thèse sera divisée en quatre chapitres, dont le premier comporte une synthèse bibliographique sur les notions fondamentales relatives au BAP, notamment, l'ouvrabilité, la rhéologie et les formulations des BAP à l'état frais, mais également leurs propriétés mécaniques et physiques à l'état durci.

Le deuxième chapitre, sable de concassage et BAP à base de sable de concassage, fait partie d'une analyse bibliographique sur les sables de concassage, leur utilisation ainsi que les performances des BAP à base de sable de concassage.

Le troisième chapitre a été consacré aux caractéristiques des matériaux utilisés et aux formulations qui ont été adoptées pour réaliser le travail expérimental. Il présente également l'ensemble des essais effectués en laboratoire pour l'élaboration d'un BAP, en donnant, à chaque fois, le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire.

Le quatrième chapitre est dédié aux résultats et discussions, il regroupe les différents résultats obtenus, leurs interprétations et leur comparaison avec des études antérieures.

Enfin, on termine cette thèse par une conclusion qui regroupe les principaux résultats obtenus et qui sera suivie de recommandations pour de futures recherches.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente une revue bibliographique sur les caractéristiques mécaniques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci, l'effet du sable de concassage sur leur formulation, ainsi que sa durabilité.

1.2 Généralités sur les bétons autoplaçants (BAP)

Les bétons autoplaçants (BAP) sont apparus à l'université de Tokyo grâce à OZAWA en 1988[1,2]. Ce sont des bétons qui se caractérisent par une grande fluidité, une bonne stabilité et une forte résistance à la ségrégation et au ressuage, pouvant se placer dans des coffrages complexes et des ferraillements denses, par simple effet de gravité sans recours à la vibration [3]. Cette technologie est restée pendant quelques années, un savoir-faire propre au Japon avant de sortir des frontières japonaises. Actuellement, elle connaît un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis et occupera, dans les années à venir, une place de plus en plus importante.

Les applications des BAP dans la construction sont nombreuses, mais leur emploi demande une évolution des moyens et des méthodes traditionnellement employés. Il existe deux catégories de bétons fluides [4] :

➤ Les bétons autonivelants (BAN), utilisés pour le coulage horizontal (dallages industriels, planchers et chapes flottantes), ont des résistances à la compression similaires à celles des bétons ordinaires (BO) jusqu'à 40MPa, du fait du rapport $E/C < 0,5$. Ce béton est moins visqueux que le béton ordinaire, et plus robuste vis-à-vis de la ségrégation, malgré une plus grande fluidité, rendue possible par l'utilisation d'agents de viscosités.

➤ Les bétons autoplaçants (BAP), employés pour un coulage vertical (voiles), peuvent atteindre des résistances plus élevées à celles d'un béton à hautes performances (BHP), soit jusqu'à 80MPa. Cette résistance est obtenue en jouant sur la teneur en eau ou sur la nature des poudres (ciment et additions minérales) qui peuvent être inertes, hydrauliques ou pouzzolaniques. Les viscosités de ces bétons sont plus élevées car les

rapports E/C sont relativement plus faibles que ceux des BAN, ce qui permet d'atteindre des résistances à la compression de l'ordre de ceux des BHP.

1.3 Avantage des BAP

1.3.1 Avantages techniques : [4-7]

- ◆ Une mise en œuvre du béton facile et rapide (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé) ;
- ◆ Tendance de bétonnage en milieux fortement ferrailés ;
- ◆ Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers ;
- ◆ Construction de formes complexes et/ou de grande hauteur ;
- ◆ Bonne qualité de remplissage (même en cas d'accès difficile) ;
- ◆ Suppression de la vibration : amélioration des conditions de travail des compagnons (santé et sécurité) ;
- ◆ Respect des riverains en chantier urbain (nuisances sonores réduites).

1.3.2 Avantages socio-économiques :

- ◆ Diminution du coût de la main d'œuvre ;
- ◆ Absence des systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier ;
- ◆ Minimisation du temps de bétonnage et des besoins de ragréage ;
- ◆ Réduction des risques d'accident.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant :

- ◆ Accroissement du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales ;
- ◆ Adéquation des matériaux ;
- ◆ Étanchéité des coffrages.

Grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent, les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication [8].

Parmi les exemples de réalisation d'ouvrages utilisant des BAP, on cite [7,8] :

- ◆ Le pont suspendu Akashi Kaikyo au Japon où le BAP contenant un filler a été utilisé pour le massif d'ancrage du plus long pont suspendu au monde (3910 m). Le volume du BAP utilisé est 380 000 m³. Grâce à l'utilisation du BAP, il a été

possible de couler une quantité de béton de 1900 m³/ jour. La densité de ferrailage et la présence de nombreuses installations temporaires étaient de 20% ;

- ◆ Le bâtiment Landmark Tower où un BAP d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur ;
- ◆ Le pont Kiba Park dans lequel 650 m³ de béton autoplaçant possédant une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa, ont été utilisés.

1.4 Les différents constituants d'un BAP

La formulation des (BAP), dépend directement, des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du BAP (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants). La diversité des matériaux et des dosages, notamment le sable et le superplastifiant, peut causer des problèmes lors de la production des BAP.

1.4.1 Le ciment

Le ciment est une matière minérale finement broyée qui, malaxée avec l'eau, constitue une pâte qui fait prise et durcit à la suite de l'hydratation et qui, après durcissement, garde sa stabilité et sa résistance même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû au processus de l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le durcissement.

La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% [9].

Les matériaux s'agglomèrent et fusionnent partiellement pour former des nodules durs et noirs de 5 à 30 mm de diamètre : le clinker. Ce dernier est constitué de quatre phases principales :

- Le silicate tricalcique (SiO₂ – 3 CaO), noté C₃S
- Le silicate bicalcique (SiO₂ – 2 CaO), noté C₂S
- L'aluminate tricalcique (Al₂O₃ – 3 CaO), noté C₃A
- Le Ferro-aluminate tétracalcique (Al₂O₃ - Fe₂O₃ – 4 CaO), noté C₄AF

La majorité des compositions de ciment nécessitent des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc., pour améliorer certaines caractéristiques

rhéologiques et/ou mécaniques du ciment. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les fumées de silice sont des particules sphériques fines de très faible diamètre, de l'ordre du dixième de micron, utilisées dans la composition, elles peuvent, par leur finesse, s'insérer entre les grains de ciment et développer la compacité du béton. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve, en général, à la surface des grains de ciment, des zones chargées négativement [10]. Il y a trois fois plus de charges négatives que de charges positives. Les réactions chimiques des composants du ciment avec de l'eau, issues de l'hydratation du ciment Portland, sont exothermiques (dégagement de chaleur). La quantité de chaleur dégagée varie en fonction du temps. L'utilisation des méthodes usuelles de calorimétrie et de conductimétrie permettent de mesurer la quantité de chaleur dégagée en fonction du temps et de suivre et mettre en évidence les différentes étapes de l'hydratation du ciment [11] (Figure. 1.1).

L'hydratation du ciment Portland est plutôt plus importante. La figure 1.2 résume de façon simplifiée l'évolution de la réaction d'hydratation de la structure de la pâte de ciment [12].

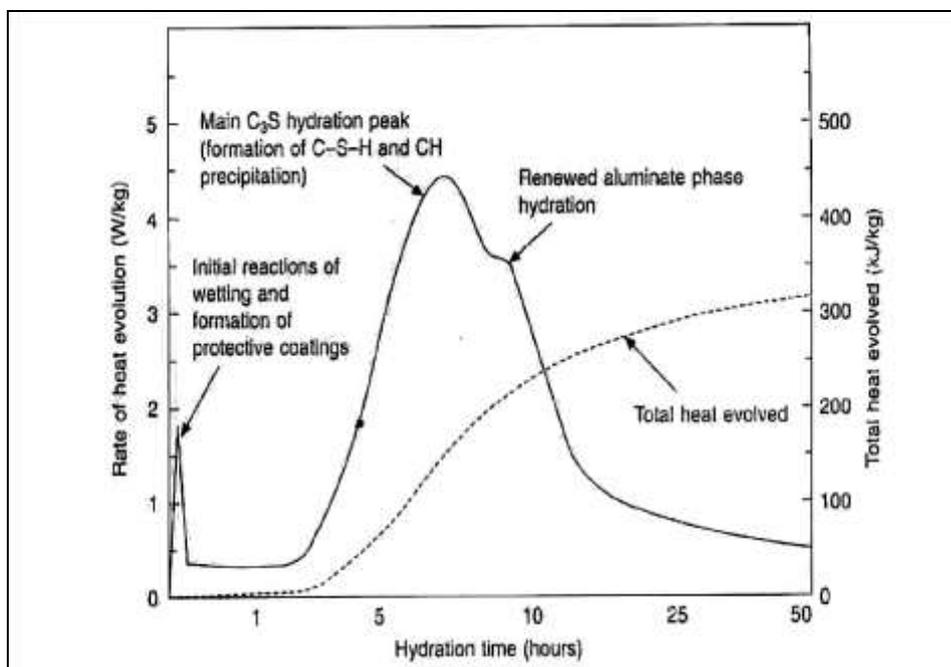


Figure 1.1: Chaleur d'hydratation de la pâte de ciment déterminée par conduction calorimétrie [11].

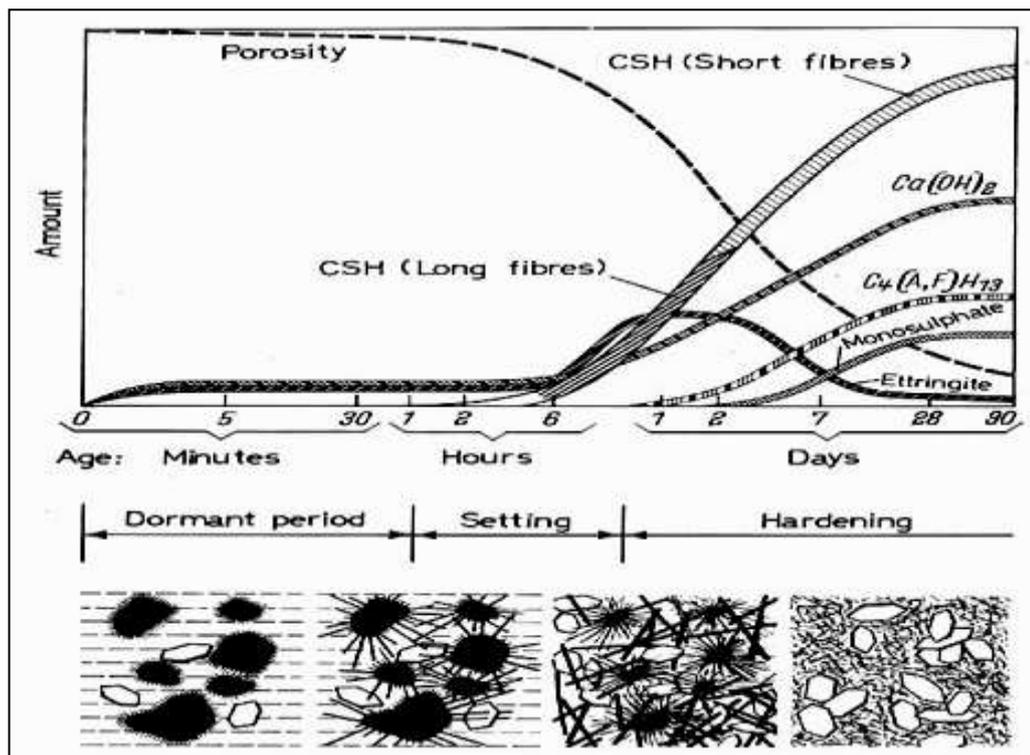


Figure 1.2: Processus d'hydratation d'une pâte de ciment Portland hydraté [12].

1.4.2 Les granulats

Les granulats proviennent des roches naturelles. Leur utilisation dans la fabrication d'un béton est justifiée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment - eau [13]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influencent d'une manière considérable le comportement du béton à l'état frais.

1.4.2.1 Le sable

La formulation d'un BAP de bonne qualité nécessite l'utilisation de sables ayant une bonne distribution granulométrique et un faible coefficient d'absorption d'eau. Les sables roulés sont préférables par rapport aux sables concassés. Le type de sable et son module de finesse jouent un rôle très important dans la détermination des propriétés des bétons. Une étude menée par Kim et al. [14] montre que le temps d'écoulement en V-funnel est plus important en utilisant un sable concassé et un sable de mer de modules de finesse de 2.87 et 3.38 respectivement. L'essai d'écoulement à travers la boîte en (U) montre que la capacité de passage est plus faible pour les BAP contenant du sable

concassé par rapport à ceux contenant du sable alluvionnaire de module de finesse de 2.67 ou du sable de mer (Figure 1. 3).

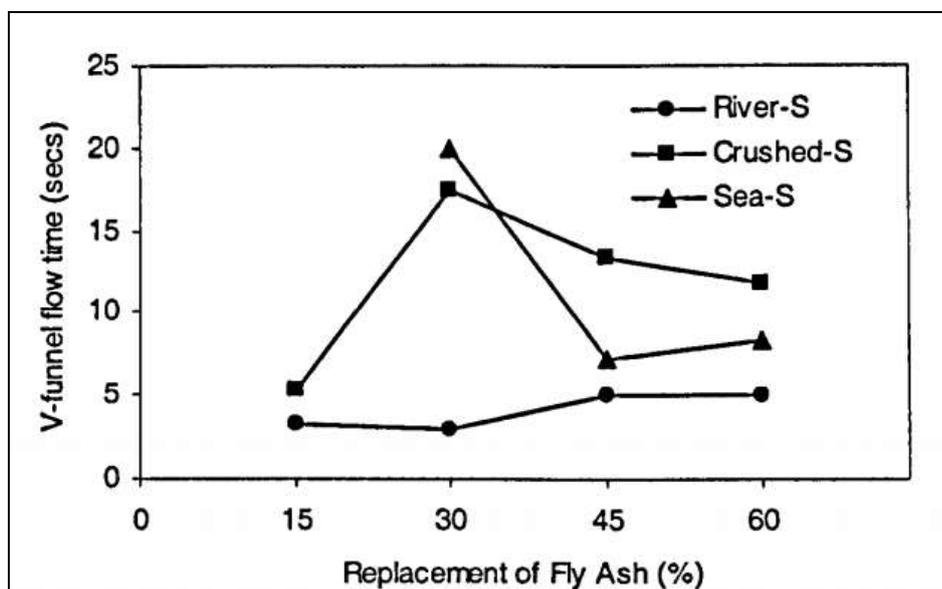


Figure 1.3: Propriétés des BAP avec différents types de sable [14].

D'après Hirata et al. [15], l'utilisation du sable avec un module de finesse de 2.4 à 2.9 donne une meilleure performance rhéologique du BAP en termes d'étalement. Cependant, le temps d'écoulement augmente avec l'utilisation du sable grossier. (Figure 1.4).

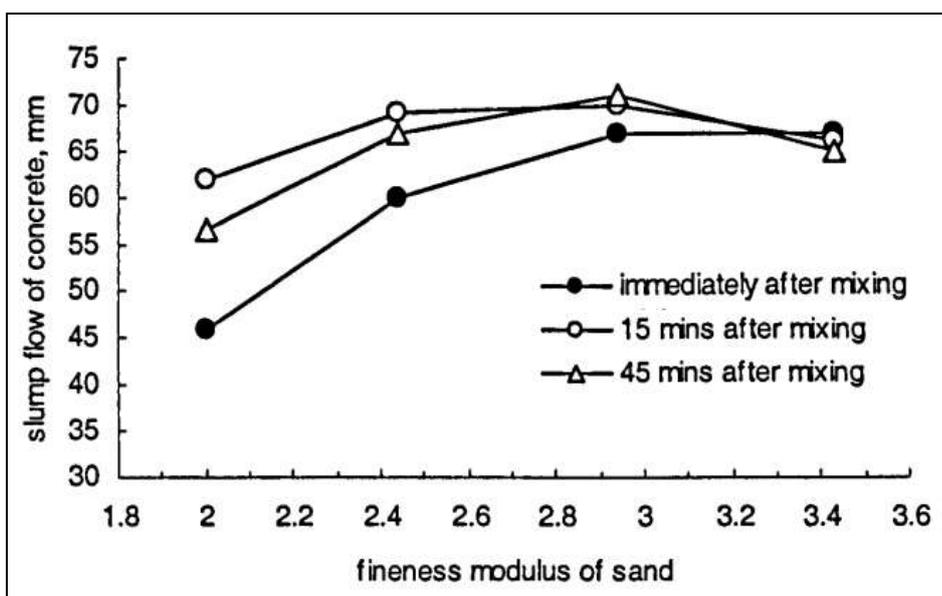


Figure 1.4: Effet de module de finesse du sable sur l'étalement du BAP [15].

Plusieurs travaux de recherches [16] ont confirmé que l'utilisation du sable roulé moyen, de module de finesse allant de 2.4 à 2.9, est recommandée pour la fabrication du BAP de bonne qualité à l'état frais. Cependant, cette qualité diminue lorsqu'on utilise du sable concassé et du sable grossier (Figure 1.5). Il a été montré également [17] que l'utilisation d'un volume de sable supérieur à 50 % dans la composition du BAP diminue la capacité de remplissage des BAP (Figure 1.6).

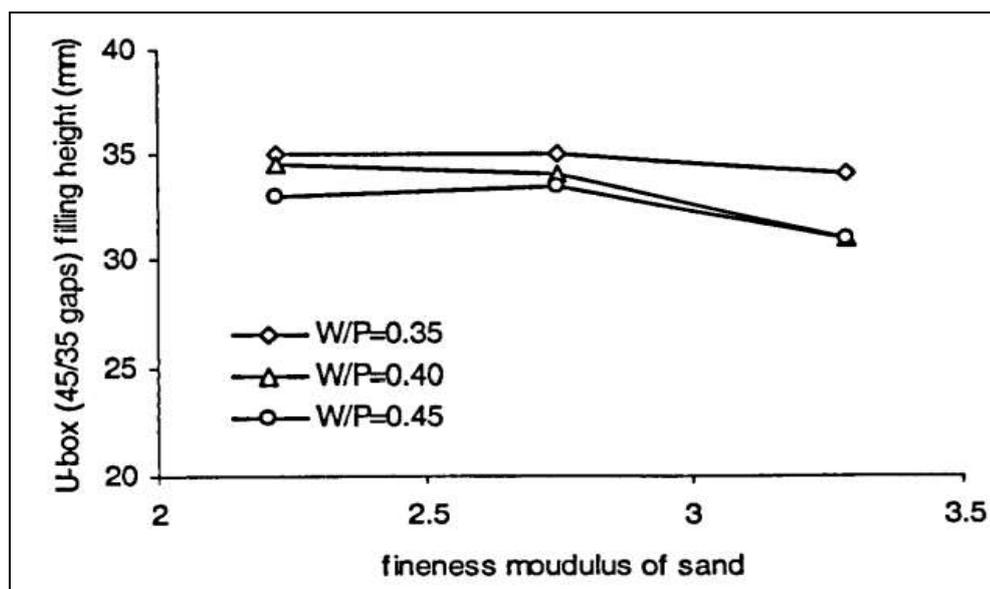


Figure 1.5 : Effet de module de finesse du sable sur la capacité de remplissage en U-box [16].

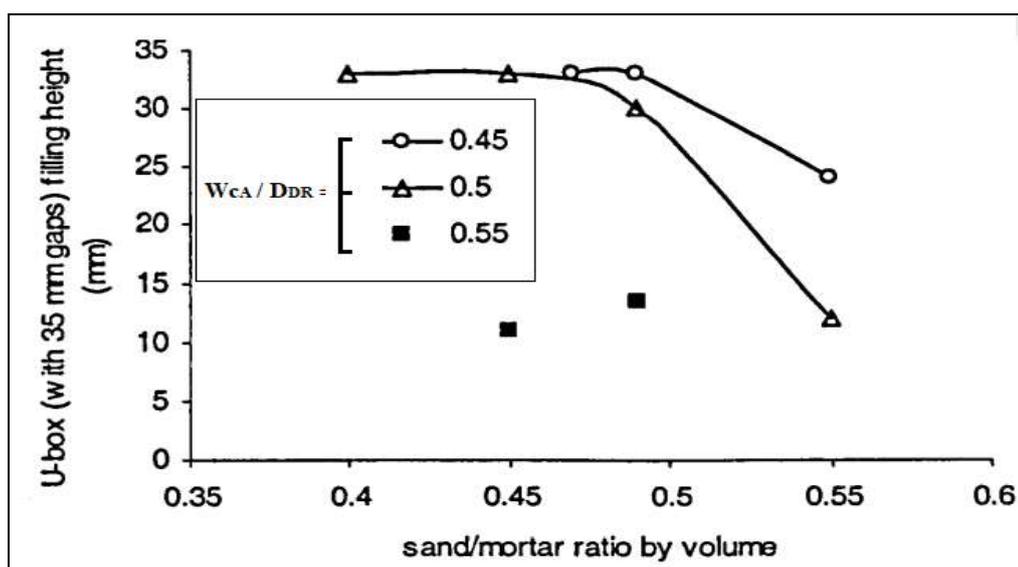


Figure 1.6 : Effet de volume du sable sur la capacité de remplissage en U-box [17].

Cependant, Chai [18] a conclu que la teneur en sable doit être comprise entre 40 à 47 % pour obtenir un BAP.

Noaki et al. [19], ont montré que l'augmentation de volume du sable dans le mortier [19], implique une demande en eau et en superplastifiant et, par conséquent une ouvrabilité plus importante (Figures 1.7, 1.8).

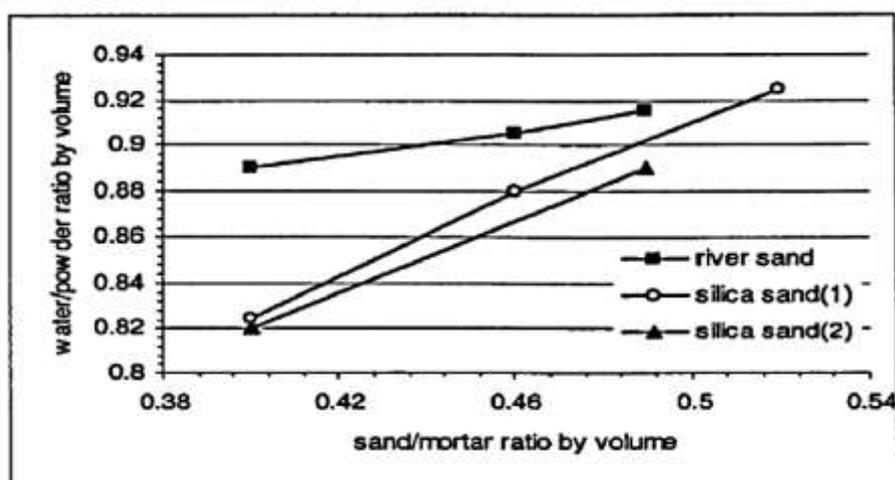


Figure 1.7 : Effet de volume du sable sur la demande en eau du mortier [18].

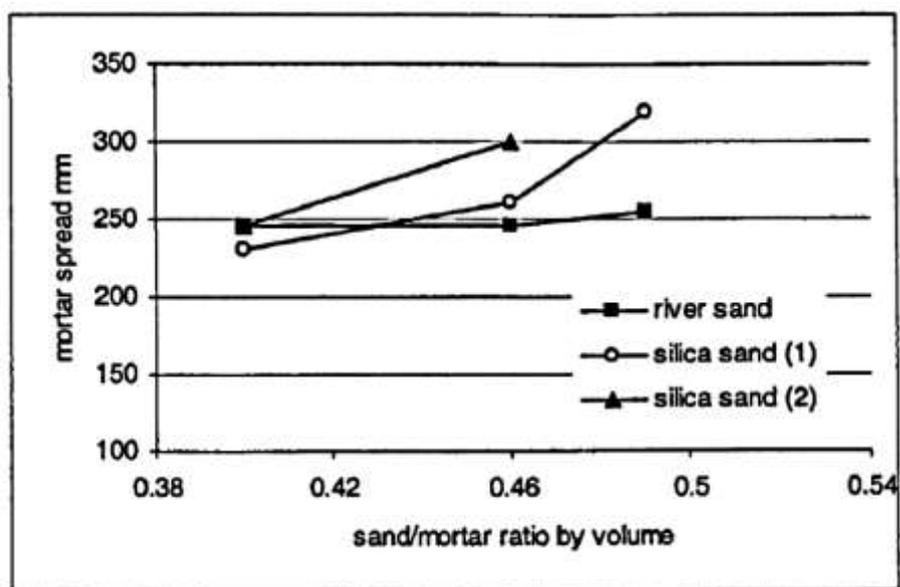


Figure 1.8 : Effet du volume de sable sur l'ouvrabilité du mortier [19].

L'humidité du sable a un effet important durant la formulation et la fabrication du BAP. D'après [20], une erreur dans le calcul de la teneur en eau, de l'ordre de 0.5%, peut causer un changement de la quantité d'eau de 8 kg/m^3 dans le béton, ce qui conduit à un

changement de l'étalement de 45 mm. Des résultats similaires [21-22], ont montré que la finesse influe sur l'étalement et la capacité de passage du BAP.

Pour consolider l'effet des fines dans le BAP, des chercheurs [23,24] ont remarqué que la sélection du type de sable est très bénéfique pour obtenir une bonne résistance à la compression avec un minimum de superplastifiant, et qu'un sable riche en fines (15-20% en poids) peut être utilisé. Menadi et al. [25] estiment que l'utilisation des sables contenant jusqu'à 15% de fines calcaires n'affectent pas la résistance du béton.

Le remplacement de 20% de sable par du laitier augmente la résistance à la compression dans les sept premiers jours comparativement à un BAP de référence mais elle rechute à 28 jours. Pour une substitution de 10% en laitier, la résistance à la compression à 28 jours est plus élevée que celle du BAP de référence [26]. L'angularité des granulats fins, caractérisée par la masse volumique apparente, influe sur la fluidité des mortiers. En effet, les auteurs ont constaté que plus la masse volumique apparente est élevée plus le mortier est fluide [27]. Bouziani et al. [28] ont trouvé qu'un remplacement massique de 10% du sable alluvionnaire par un sable de dunes contribue à l'amélioration de la fluidité et à la diminution de la viscosité du béton fluide étudié (Figure 1.9).

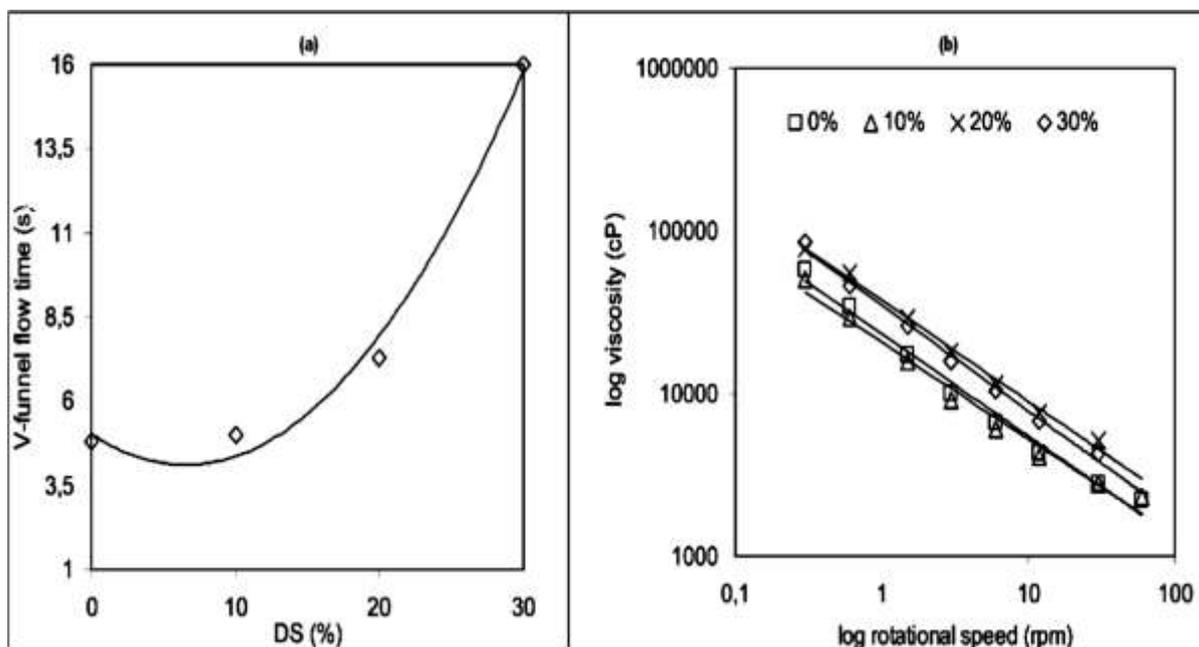


Figure 1.9 : Effet de sable de dunes sur : (a) le temps d'écoulement au V-funnel

et (b) la viscosité d'un béton de sable fluide [28].

1.4.2.2 Le gravier

Les gros granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Le choix des granulats roulés ou concassés dépend de la disponibilité locale des matériaux [29].

Les frottements entre les granulats défavorisent l'étalement et l'aptitude au remplissage des BAP. Les travaux d'Okamura et Ouchi [30] ont montré que la diminution de la capacité de remplissage est due à l'augmentation de la quantité de gros granulats dans le BAP. Egalement, Yammine et al. [31] ont rapporté que pour une fraction volumique granulaire inférieure à environ 62%, le BAP reste dans les limites de fluidité exigée, mais son étalement au cône d'Abrams et son écoulement à la boîte LCPC, seront supérieurs à 550 mm (Figure 1.10), ce qui correspond à une capacité de passage inférieure à 0.8, limite recommandée par l'AFGC (mesurée par la boîte en L).

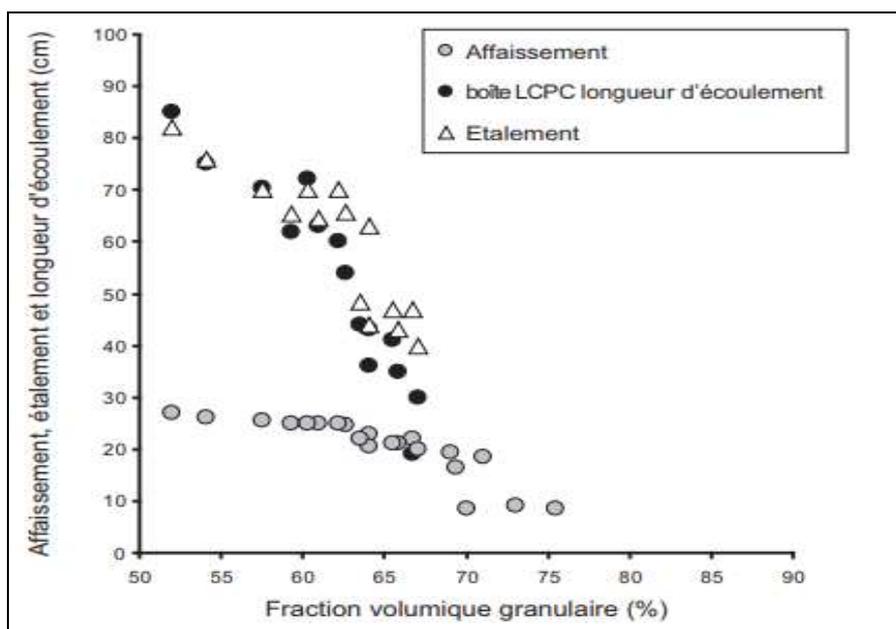


Figure 1.10 : Résultats empiriques des mesures d'affaissement et d'étalement au cône d'Abrams et de longueurs d'écoulement à la boîte LCPC [31].

L'influence du rapport G/S sur la résistance mécanique à la compression, représentée sur la figure 1.11, a montré que la diminution du rapport G/S affecte négativement la résistance mécanique du béton [31].

Une étude parallèle montre, que la quantité des gros granulats peut être réduite sans grande influence sur la résistance à la compression dans la limite de 0,3 à 0,4 du rapport

gros granulats sur la quantité totale des granulats [33]. Le risque de blocage pour un milieu fortement ferrillé augmente lorsque la taille maximale des gros granulats augmente [34]. Pour les BAP, les recommandations de l'AFGC préconisent un faible volume de gravillon et un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1.

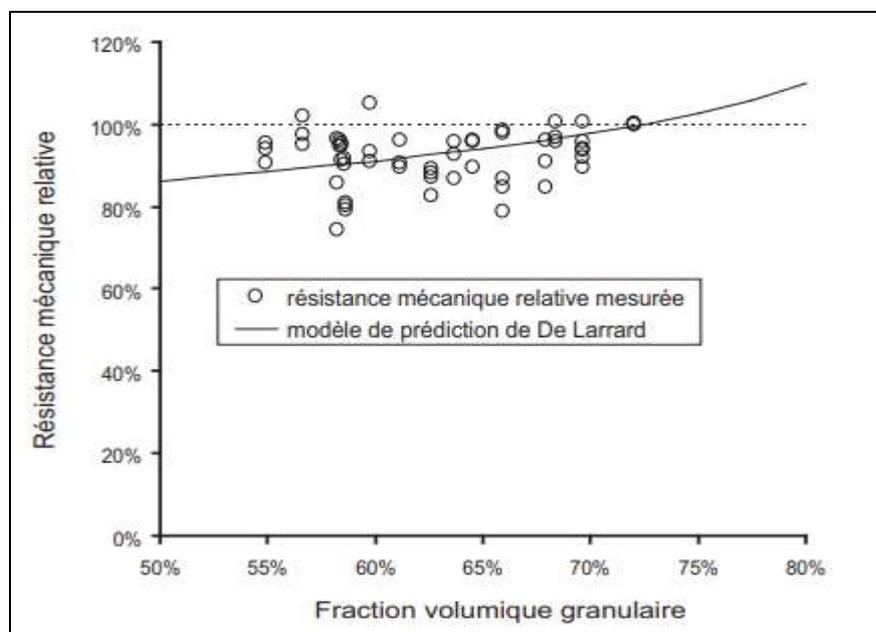


Figure 1.11 : Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du rapport G/S [31].

1.4.3 L'eau de gâchage

La confection des BAP nécessite une eau de gâchage propre et qui ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [35] :

- 2 g/l pour les bétons à hautes résistances ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances ;

L'eau de gâchage ne doit pas contenir de sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère aux bétons frais les propriétés rhéologiques d'un pseudo liquide permettant l'écoulement et le moulage ; une fonction chimique d'hydratation du ciment qui apporte la résistance mécanique [36].

1.4.4 Les fines (Ajouts minéraux)

Pour assurer une maniabilité suffisante au BAP, tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) supérieure à celle des bétons conventionnels est nécessaire. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats.

Le volume de la pâte a un rôle important dans la fluidité et la liaison entre les plus gros grains car l'ajout de fines réduit cette interaction, donc il est nécessaire dans le cas des BAP de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Quelques additions sont connues dans la littérature telles que cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et filler calcaire. Ces dernières, et selon leur nature, peuvent avoir un effet chimique et/ou physique [37,45].

1.4.4.1 Les fumées de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de divers mélanges de ferrosilicium ou de zirconium. En général, elle est composée de silice vitreuse et sa teneur en SiO_2 varie en fonction du modèle d'alliage produit. Plus la quantité en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO_2 est élevée.

Les fumées de silice sont des particules amorphes, qui se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0,03 \mu\text{m}$ et $0,3 \mu\text{m}$ (le diamètre moyen est de $0,1 \mu\text{m}$), elles sont 100 fois plus fines que les particules de ciment.

Des études ont analysé l'influence des fumées de silice sur les propriétés des BAP. Ces recherches ont montré que les fumées de silice favorisent le développement du seuil de viscosité en augmentant la compacité des mélanges [38 - 40]. Cependant, Carlsward et al. [41] ont remarqué que les fumées de silice ne changent pas la viscosité.

Ferraris et al. [40] observent que l'incorporation de fumées de silice dans les pâtes de ciment ou dans les bétons encourage la demande en eau et en superplastifiant.

La figure 1.12 présente l'influence du taux de remplacement du ciment par la fumée de silice (FS) sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment ayant un rapport E/L fixe (0,35) et un dosage en SP fixe de 2 % [38].

Ces résultats montrent que l'augmentation du pourcentage de FS contribue à l'augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique des mélanges.

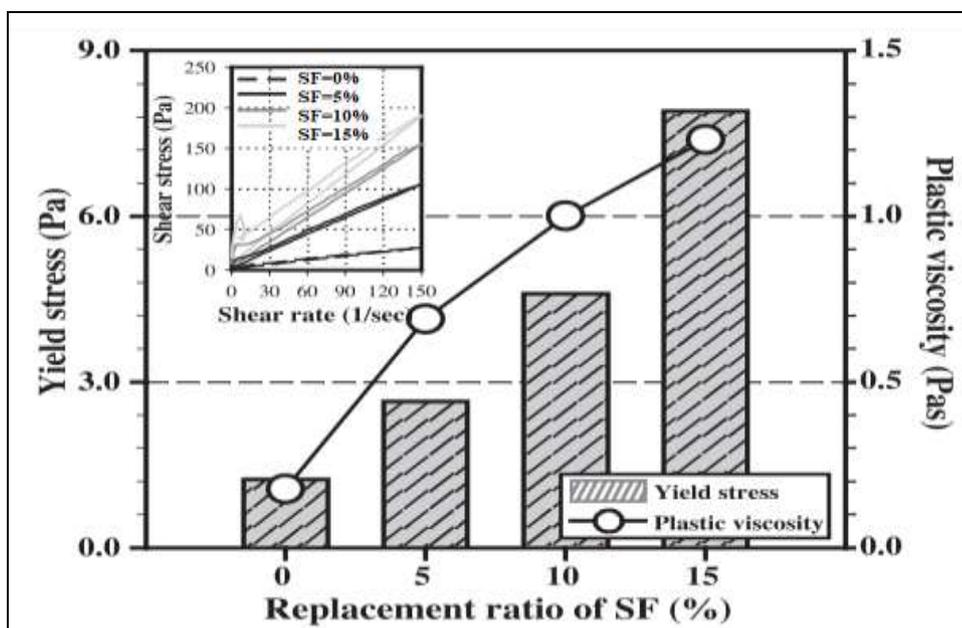


Figure 1.12: Influence du taux de remplacement par la fumée de silice (FS) sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [38].

1.4.4.2 Les fillers calcaires

Actuellement, les fillers calcaires sont plus demandés dans l'industrie du ciment et du béton. Ils sont soit obtenus lors du concassage des granulats calcaires, soit par broyage du matériau cru. Ces fillers se composent chimiquement de carbonate de calcium (CaCO_3), et sont appelés fillers calcaires s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Une étude menée par Zhu et Gibbs [42] montre l'influence de différents types de filler calcaire sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment et du béton. Cette recherche a montré que l'étalement des pâtes de ciment ne dépend pas du type de filler utilisé. En revanche, dans le béton, le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. En effet, le filler à base de craie nécessite plus d'adjuvant qu'un filler calcaire. La différence est expliquée par la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption. Les résultats montrent que pour plus de substitution de ciment par des fines, la demande en superplastifiants est moins importante pour un étalement donné. Selon les auteurs [21,25,43] les fillers calcaires peuvent contribuer à la fluidité de la pâte interstitielle et, à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A ainsi qu'au remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique.

1.4.4.3 Les cendres volantes (CV)

Ces ajouts sont obtenus par des dépoussiérages électrostatiques ou mécaniques de particules pulvérulentes provenant du courant des gaz de chaudière, alimentées au charbon pulvérisé. Pour mettre en évidence l'effet des CV sur le comportement rhéologique des pâtes de ciment, Ferrari et all. [39] ont étudié quatre mélanges contenant 12 % de CV avec un même rapport E/L (0,35) et un même dosage en SP (0,45 %). Les résultats obtenus ont montré que le diamètre moyen des cendres volantes a une influence sur la valeur du seuil de cisaillement et la viscosité (Figure 1.13).

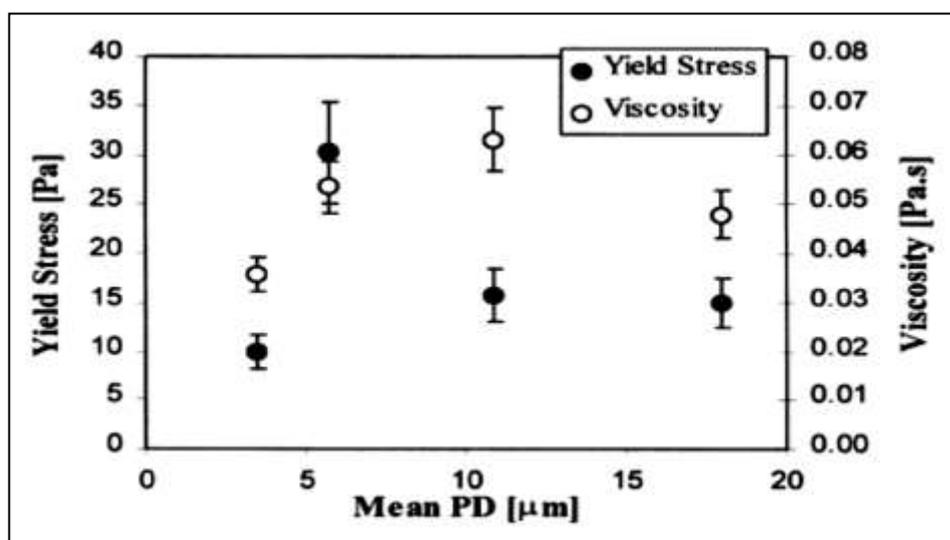


Figure 1.13 : Effet du diamètre moyen des CV sur les propriétés rhéologiques des pâtes [39].

D'autres études [38] montrent que le diamètre moyen des particules de cendres volantes a une légère incidence sur le seuil d'écoulement. L'incorporation d'un volume important de cendre volante (40 à 60%) dans les BAP a été menée par Lachemi [40], où il a montré la possibilité de produire un BAP avec 50% de CV, avec un rapport E/L de 0.45. La résistance à la compression à l'âge de 28 jours trouvée, est de l'ordre de 35 MPa. Khatib .J.M [43], a formulé des BAP avec un rapport E/L de 0.36, et un dosage de superplastifiant de l'ordre de 0.7% sachant que le taux de remplacement du ciment par les CV est de 60 à 80 %. Cette étude a montré que l'utilisation des CV augmente la fluidité en comparaison au BAP témoin, de même les résistances à la compression sont améliorées à l'âge de 56 jours. L'augmentation du pourcentage de taux de CV a induit une diminution du retrait de séchage.

1.4.4.4 Les laitiers de hauts fourneaux

Ce sont des résidus minéraux de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il est broyé et ajouté en proportions variables au clinker. Le laitier peut non seulement améliorer les propriétés rhéologiques [45] mais aussi augmenter significativement les performances mécaniques et la durabilité à long terme du béton. La substitution d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [38, 40]. La figure 1.14 montre que 30 % de remplacement du ciment par le laitier semble être un optimum d'un point de vue rhéologique.

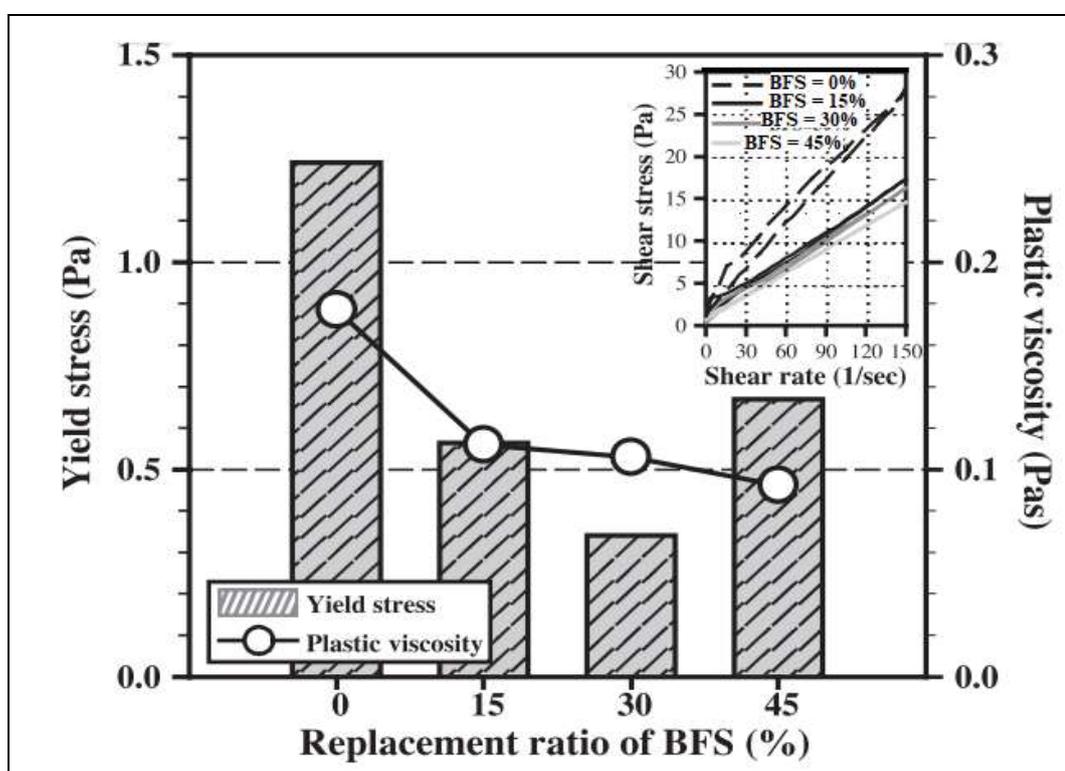


Figure 1.14 : Influence du taux de remplacement par le laitier de haut fourneau (L) sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [39].

Shi et al. [46] ont prouvé que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil de cisaillement. En outre, Yahia et al. [47] ont remplacé partiellement le ciment par le laitier à taux de 20%, 30 %, et 40 %, avec un rapport E/L de l'ordre de 0.4. Les résultats trouvés ont montré que plus

le pourcentage de laitier augmente, plus la fluidité (essais d'étalement au mini cône) est améliorée.

1.4.4.5 La pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes dont l'emploi et les propriétés liantes ont été observées à partir de l'époque romaine doivent leur nom aux cendres volcaniques de la région de Pouzzoles en Italie. Ce sont des produits d'origine volcanique ou des roches sédimentaires généralement composées de silice d'alumine et d'oxyde de fer et possédant naturellement des caractéristiques pouzzolaniques.

En présence d'eau, elles sont qualifiées à réagir, avec de l'hydroxyde de chaux, pour donner des mélanges stables, peu solubles dans l'eau et ayant des propriétés liantes. Leur structure chimique est similaire aux cendres volantes, mais elles sont fabriquées à haute température par les éruptions volcaniques [48]. Les matériaux pouzzolaniques naturels les plus connus sont les cendres volcaniques, la pouzzolane naturelle, la pierre ponce, les argiles schisteuses, les opalines, les terres à diatomées calcinées et l'argile cuite.

L'étude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur les performances mécaniques des BAP a montré que 15% de teneur en pouzzolane naturelle contribuent à une augmentation importante des résistances mécaniques après 28 jours [49].

1.4.5.6 Le métakaolin

Rackel, S.N [50] a étudié l'effet du remplacement du ciment par le métakaolin sur l'étalement du BAP, cette étude a montré que le BAP avec 25% de métakaolin donne un étalement allant de 60 à 75 cm.

D'après [51] l'incorporation des différents taux de métakaolin (0, 5, 11 et 15 %), dans la formulation des mortiers, induit une augmentation de la résistance mécanique à la compression du mortier par rapport à un mortier contenant seulement du ciment.

D'autres études [52-55] ont montré que la demande en eau s'élevait avec la quantité de métakaolin introduite.

1.4.5 Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des substances organiques qui sont incorporés dans le béton frais pour favoriser quelques propriétés souhaitées. Ils sont divisés en groupes de produits parmi lesquelles nous citons les principaux : Polynaphtalène sulfonate (PNS), Polymélamine sulfonate (PMS), Lignosulfonates modifiés (LS), Polycarboxylate (PC), Polyacrylate (PA) et Polyoxyéthylène (POE).

Parmi les fonctions de base d'un superplastifiant, figure la fluidification, par l'ouvrabilité d'un mélange cimentaire, c'est-à-dire qu'il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte, du mortier ou du béton. Il a aussi un rôle de réducteur d'eau en diminuant le rapport E/C pour une même ouvrabilité [56], voir figure 1.15. Ceci contribue donc au développement des propriétés rhéologiques et mécaniques du mélange [57].

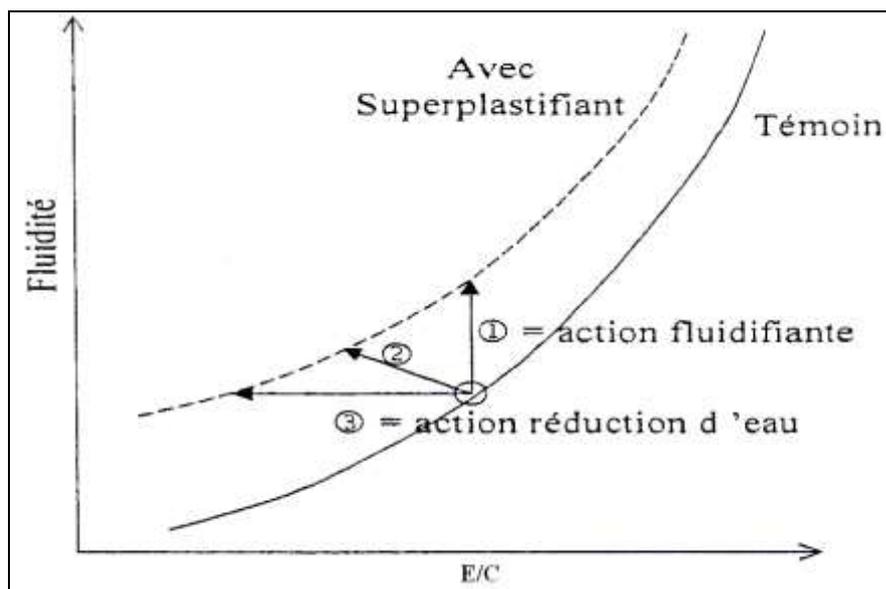


Figure 1.15 : Fluidité en fonction de superplastifiant [56].

Les superplastifiants réagissent avec le ciment et les fines en s'adsorbant à leur surface pour la défloculation des grains de ciment dont l'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton [58,59], voir la figure 1.16 [22]. Plusieurs chercheurs ont montré que l'utilisation d'un superplastifiant est essentielle pour la formulation de bétons autoplacants [1, 60-62].

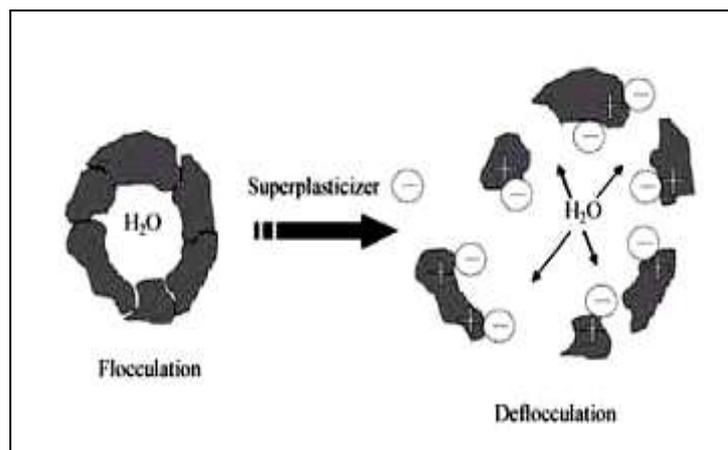


Figure 1.16 : Dispersion des grains de ciment par l'ajout du superplastifiant [22].

1.4.6 Les agents de viscosité

Les agents de viscosité sont des substances à base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivés cellulosiques se présentant sous forme de poudre. L'intérêt de l'utilisation d'un agent de viscosité a été bien éclairci par Khayat K.H [63]. Donc, pour un squelette granulaire, la combinaison entre un agent de viscosité et un superplastifiant améliore les caractéristiques du béton frais par l'augmentation de la résistance à la ségrégation et au ressuage (Figure 1.17).

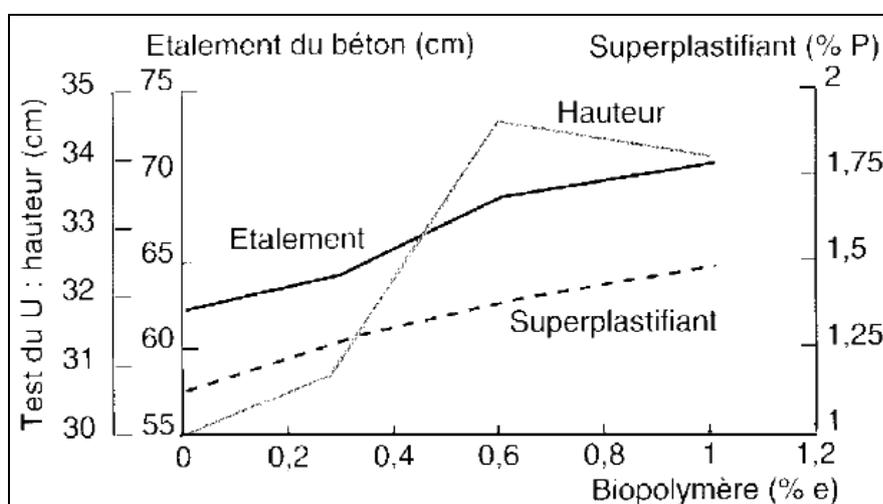


Figure 1.17 : Propriétés du béton optimisé pour différentes teneurs en agent de viscosité [58].

Chopin [64], a démontré que dans le domaine de l'industrie, les agents de viscosité contribuent à la diminution de la sensibilité des bétons autoplacants aux variations de la teneur en eau. Une étude a montré que ces agents participent au maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps évalué à environ une heure [65]. En

général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité, il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif.

1.5 Méthodes de formulation des bétons autoplaçants

La formulation des BAP dépend directement de leurs propriétés souhaitées (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage etc.). Cependant, ces caractéristiques compliquent relativement la formulation du béton. La complexité consiste souvent à combiner un ciment, un ajout minéral et un superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide [66]. Malgré les nombreuses études qui ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, à l'heure actuelle, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie. Plusieurs approches de formulation ont été développées dans des pays différents. La première méthode empirique de formulation du BAP a été proposée au Japon par Okamura et Ouchi [3, 30]. Petersson et al. [67] ont développé une méthode qui sert à trouver la teneur maximale de granulat sans faire de blocage autour des armatures. Cette méthode a été améliorée par Bui et al. [68] par l'ajout d'un critère de phase liquide. SU Nan et al. [69] ont proposé une méthode qui vise à ajuster la teneur relative en granulat et celle de la pâte par l'introduction d'un coefficient de packing factor (PF). Pour prévoir le comportement du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire, un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, a été développé par Sedran et de Larrard [70]. En général, les méthodes de formulation les plus utilisées sont comme suit :

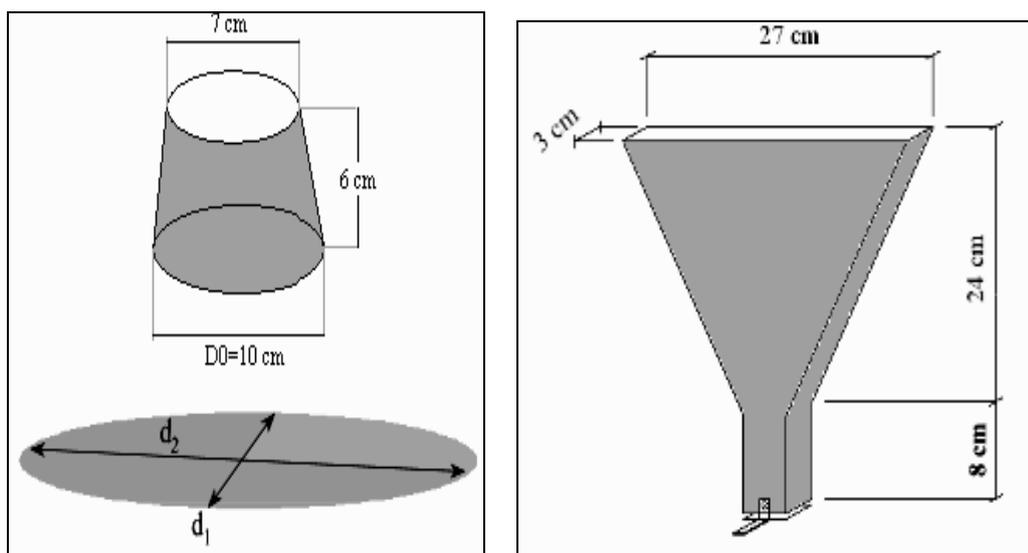
1.5.1 Méthode japonaise (Optimisation du volume du mortier)

C'est une méthode proposée par les chercheurs japonais Okamura et Ozawa [71-77], appuyée sur les principes suivants :

- Le volume en gravillons du béton est limité à 50% du volume du solide, pour réduire le risque de blocage.
- La teneur volumique du sable est maintenue à 40% du volume total du mortier.

- L'Optimisation de la pâte est réalisée sur un mortier dont le volume en sable est égal à 40%.
- Le rapport Eau/Liant et dosage en superplastifiant sont effectués à l'aide des essais sur mortiers (essais d'étalement au mini-cône et au V-Funnel).

Ces essais sont exécutés avec des appareils d'essai dont les dimensions sont proportionnelles (d'un coefficient ≈ 2) à ceux utilisés avec le béton (le cône d'Abrams, et l'entonnoir), (Figure 1.18).



a - Mini-cône (Etalement)

b- V-funnel (temps d'écoulement)

Figure 1.18: Dimensions des appareils utilisés pour le mortier [77].

Les chercheurs décrivent alors deux (2) grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement :

$$T_m = ((d)^2 + (d_0)^2)/(d_0)^2 \quad (1.1)$$

$$R_m = 10/t \quad (1.2)$$

Où :

T_m : l'étalement relatif

R_m : la vitesse relative d'écoulement ;

d : l'étalement ($d = (d_1 + d_2)/2$) ; **d₀** : le diamètre inférieur du cône ; **t** : le temps d'écoulement du mortier.

Certaines études [78-80] montrent que pour un BAP, les deux grandeurs T_m et R_m ont les valeurs 5 et 1, respectivement.

Cependant, plusieurs corrections ont été faites sur cette méthode. Une étude [77] a montré qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à une limite de 60% du volume total du solide et obtenir un béton autoplaçant. Edmatsu et al. [81] ont réussi, à l'aide d'emploi d'additions minérales, d'augmenter le dosage en sable dans le mortier et de réduire donc le volume de la pâte.

1.5.2 Méthode suédoise (Optimisation du volume de la pâte)

Cette méthode a été développée par CBI (Cement och Betong Institutet) [67, 82-83] et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, elle est basée sur le principe de la fluidité dans les milieux ferraillés. Elle permet d'évaluer le volume de la pâte critique pour le blocage à chaque confinement et rapport G/S donnés.

Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les caractéristiques souhaitées. Les proportions de la pâte sont optimisées par la suite pour assurer de bonnes propriétés rhéologiques et mécaniques. En fait, cette approche présente une meilleure optimisation du squelette granulaire, cependant le critère de blocage n'est pas général pour les différents types de granulat.

1.5.3 Méthode Française (LCPC) (optimisation du squelette granulaire)

Cette méthode a été développée par Sedran et de Larrard [84-86], il s'agit d'un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Elle sert à prévoir la compacité d'un mélange granulaire selon les distributions granulaires et proportions du mélange, leur compacité propre et densité apparente.

Pour déterminer les proportions des divers constituants, la méthode préconise une proportion du liant fixée à priori (70% du ciment, 30% d'addition par exemple), et la détermination du dosage de saturation en superplastifiant, ainsi que l'estimation de la quantité d'eau nécessaire en présence de superplastifiant. Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

1.5.4 Approche de l'AFGC (Association Française de Génie Civil) [87]

Des recommandations et fourchettes sont mises en place pour la caractérisation des BAP à l'état frais :

- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³ (de l'ordre de 40 % du volume total).

- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m^3) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.
- Un volume de gravillons limité basant sur un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1 afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées.
- Un diamètre maximal réduit, en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement.
- Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage de saturation) pour obtenir la fluidité souhaitée.
- Emploi éventuel d'un agent de viscosité.

Donc la formulation se fait sur la base de ces plages, et ne peut être vérifiée que par des essais effectués directement sur béton.

1.5.5 Conclusion

Selon les méthodes citées précédemment, certains chercheurs [88], ont estimé que l'approche LCPC donne des résultats satisfaisants. Cependant, d'autres auteurs [81],[89] rapportent qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux utilisés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays. Toutefois, ces méthodes ne sont pas applicables pour la formulation des bétons autoplacants contenant des agents de viscosité [90].

1.6 Caractérisation des bétons autoplacants

1.6.1 Propriétés des BAP à l'état frais

En général, les bétons autoplacants sont caractérisés à l'état frais par deux paramètres essentiels, la fluidité et l'homogénéité et leurs formulations sont actuellement conçues de manière empirique. Ces paramètres sont étudiés sur plusieurs aspects, et peuvent se classer en trois critères mesurables par des tests empiriques :

- Le remplissage ;
- La résistance à la ségrégation ;
- La capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons par la suite « la capacité de passage » [91].

1.6.1.1 Remplissage du béton

Le remplissage du béton ou la déformabilité est un paramètre qui dépend directement de sa fluidité. Le BAP est apte à remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son poids propre et sans outil de vibration. Le remplissage est visé par deux aspects : l'aptitude de remplissage et la vitesse de remplissage.

Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton. Le deuxième est lié à la vitesse de déformation, Le test d'étalement au cône d'Abrams permet d'évaluer ces deux aspects [91], car la capacité de déformation est représentée par le diamètre final atteint par la galette de béton, et la vitesse de la déformation du béton est traduite par le temps de passage à un certain diamètre (50 cm).

1.6.1.2 Résistance à la ségrégation

Le phénomène de ségrégation d'un mélange est expliqué par l'absence d'homogénéité dans la distribution des composants, ce qui conduit à une séparation ou dispersion de l'état solide et liquide ou par une dispersion des phases solides en fonction de leurs dimensions [77, 92].

La ségrégation dans un béton est constatée sous plusieurs styles, une séparation entre la pâte et les granulats ou entre le gravier et le mortier. Cette ségrégation résulte un blocage du mélange en zones confinées et d'une mauvaise répartition de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton, ainsi que l'utilisation des agents de viscosité.

1.6.1.3 Capacité de passage

La capacité de passage, c'est l'aptitude d'un béton à s'écouler librement dans des milieux confinés fortement ferrailés. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de gros granulats dans le béton, et d'autre part, par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Donc le béton autoplaçant doit avoir une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les confinements.

Cela impose une quantité de gravier inférieure à celle d'un béton ordinaire et de taille maximale plus petite [93].

1.6.2 Caractérisation des BAP à l'état frais

Les BAP sont caractérisés en général par leurs caractéristiques à l'état frais, de ce fait, la caractérisation et la vérification des propriétés à l'état frais sont nécessaires pour aboutir aux performances désirées des BAP. L'AFGC [87] a mis en évidence des recommandations de caractérisation qui servent actuellement de références normalisées. Les résultats de ces essais permettent de confirmer la formulation d'un BAP. Pour cela, l'ouvrabilité des BAP se divise en trois caractéristiques essentielles :

- Mobilité en milieu non confiné (traduit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams) ;
- Mobilité en milieu confiné (traduit par l'essai d'écoulement à la boîte en L) ;
- Stabilité (résistance à la ségrégation traduite par l'essai de stabilité au tamis).

1.6.2.1 Essais de fluidité

a- Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams)

Cet essai est préconisé pour évaluer la fluidité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires, et ce, à l'aide du cône d'Abrams (Figure 1.19) [87].

Le diamètre d'étalement permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton autoplaçant.

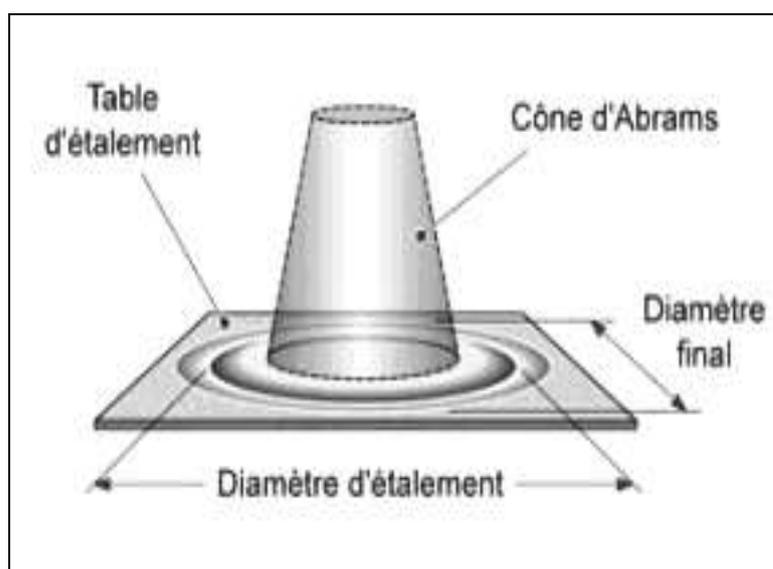


Figure 1.19: Schéma de l'essai d'étalement au cône (Slump Flow) [87].

b- Mesure de la vitesse d'étalement (Essais au cône d'Abrams)

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 500mm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T500, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T500 traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation.

Conformément aux recommandations de l'AFGC 2000 [87] les valeurs d'étalement pour un BAP sont comprises entre 550 et 850 mm (sans ségrégation et sans ressuage). Le temps pour atteindre une galette de diamètre 500 mm (T_{500}), donne également une idée sur la vitesse d'écoulement du béton.

c- Essai de V-funnel

La capacité de passage du béton en milieu non confiné peut être évaluée grâce à l'entonnoir de forme V, dite V-funnel. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire avec des dimensions de 7,5 cm x 6,5 cm. Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 litres de béton passant à travers une ouverture étroite (Figure 1.20).

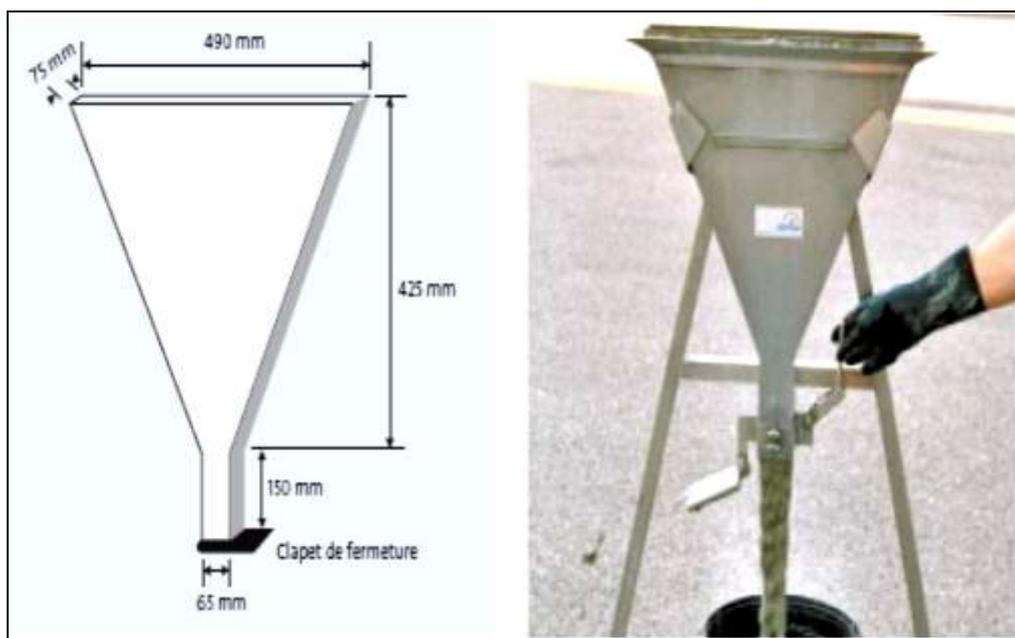


Figure 1.20: L'essai de V-funnel [96].

Le temps (en seconde) nécessaire au béton pour s'écouler à travers cet entonnoir est mesuré et enregistré comme le temps d'écoulement du V-funnel [94] et plus le temps d'écoulement est court et plus la fluidité du béton, est importante.

La dispersion des granulats au goulot de l'entonnoir est un signe de ségrégation, et si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton est plus important [95].

Domone et al. [96] montrent que pour obtenir un BAP, le temps d'écoulement à l'entonnoir doit être inférieur à 12 secondes et un temps compris entre 4 et 12 secondes offre au béton une viscosité suffisante.

1.6.2.2 Essai de ségrégation dynamique

Essai de la boîte en L

Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures (figure I.6) bloquant alors l'écoulement du béton.

L'essai consiste à remplir la partie verticale de la boîte en béton en une seule fois. Après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres) (Figure 1.21) [97].

Après l'achèvement de l'écoulement, les deux hauteurs H1 et H2 seront mesurées et, ensuite, le taux de remplissage est calculé à partir du rapport H2/H1. Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou s'il y a blocage des granulats, c'est un signe d'apparition de la ségrégation [91].

La vitesse de l'écoulement du béton peut être évaluée à partir de son temps de passage à des lignes de 20 cm et de 40 cm de la partie horizontale de la boîte.

Arbelaez et al. [98] préconisent des temps inférieurs à 1,5 secondes pour T20, et inférieurs à 3,5 secondes pour T40 afin que le béton puisse figurer dans un domaine autoplaçant.

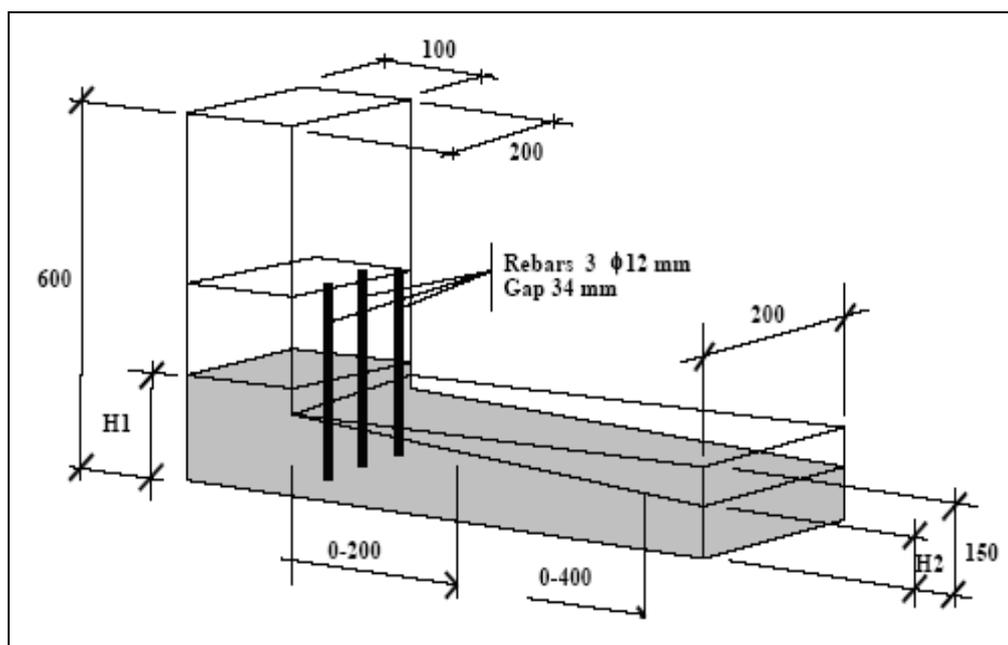


Figure 1.21: Dimensions de la boîte en L [97].

1.6.2.3 Essais de ségrégation statique

- Essai de stabilité au tamis

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage (Figure 1.22). Il peut être employé sur des bétons frais soit au laboratoire pour étudier leur formulation, soit sur chantier pour vérifier leur stabilité [99]. L'essai permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation.

Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un seau, puis couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis

Des études montrent [100] que l'augmentation du dosage en fines dans un mélange diminue le ressuage car les particules fines s'hydratent plus vite et leur taux de sédimentation est plus faible, par conséquent, les BAP fortement dosés en fines sont moins susceptibles de ressuer.



Figure 1.22: Essai de stabilité au tamis [99].

1.6.3 Rhéologie des bétons autoplaçants

1.6.3.1 Définition

La rhéologie est la science qui sert à analyser l'écoulement, les déformations, et plus généralement la viscosité des matériaux sous l'action des contraintes [101-104]. La caractérisation de l'écoulement des bétons autoplaçants peut se réaliser grâce à l'étude de leurs propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. La rhéologie, donc, permet de comprendre les interactions entre les différents composants du matériau et d'effectuer un contrôle de leur qualité. Les essais rhéologiques permettent de déterminer une relation entre la contrainte de cisaillement, la déformation et le temps à travers des modèles ou des lois mathématiques (Figure 1.23). [105]

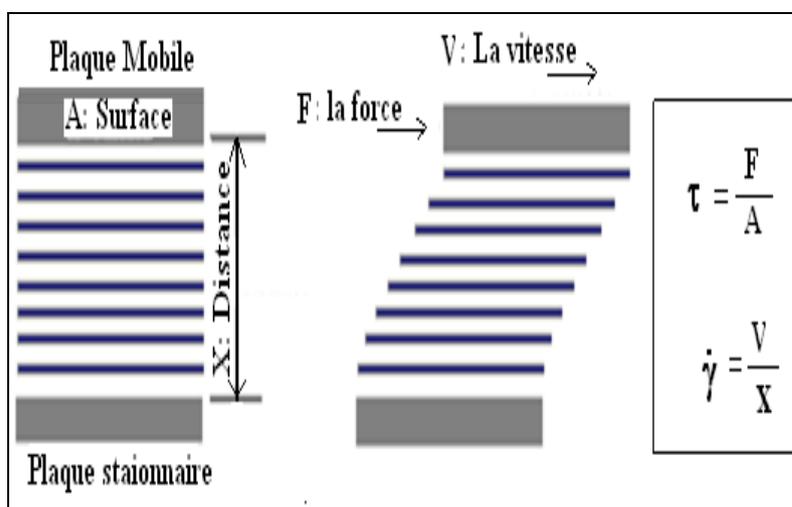


Figure 1.23 : Schéma représentatif d'un fluide modèle [105].

1.6.3.2 Paramètres de rhéologie

Les paramètres rhéologiques principaux qui déterminent le comportement rhéologique d'un béton frais sont le seuil de cisaillement et la viscosité.

a) Viscosité

La viscosité c'est la résistance à l'écoulement d'un fluide soumis à une contrainte tangentielle et elle est représentée par le coefficient μ [Pa.s]. Elle joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise son comportement rhéologique [106,107]. Ce paramètre est défini comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ , et le gradient de vitesse de cisaillement correspondant $\dot{\gamma}$:

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

Les valeurs de la viscosité plastiques trouvées par certains chercheurs, sont résumées dans le tableau ci-dessous [117]:

Tableau 1.1 : Viscosité plastique en fonction du type de matériaux [117]

| Matériaux | Pâte | Mortier | BAP | BO |
|----------------------------------|--------------|---------|--------|--------|
| Viscosité plastique μ (Pa.s) | 10^{-2} -1 | 1-5 | 20-150 | 50-100 |

b) Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 exprime la contrainte minimale exercée sur le fluide afin de commencer un écoulement. En dessous de cette contrainte, aucune déformation ne se produit. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas. Les auteurs [108] ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est l'apparition macroscopique du frottement entre les grains qui font partie du squelette granulaire du béton, y compris les grains de ciment et les particules ultrafines. En général, pour déterminer le seuil de cisaillement τ_0 , il suffit de déstructurer entièrement la suspension testée en exerçant un gradient de vitesse assez élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement en vitesse, en faisant varier le gradient de vitesse, et de déduire la valeur de la contrainte correspondant à une valeur nulle du gradient de

vitesse, selon l'équation du modèle [109]. Le tableau 1.2, présente les valeurs de seuil de cisaillement pour quelques matériaux [119,128]:

Tableau 1.2 : Seuil de cisaillement en fonction du type de matériaux [112]

| Matériaux | Pâte | Mortier | BAP | BO |
|-----------------------------|-------|---------|--------|----------|
| Seuil de cisaillement (Pas) | 10-50 | 10-100 | 50-200 | 400-1500 |

c) Différents comportements rhéologiques

Les écoulements des fluides sont distingués par des lois de comportements linéaires et non linéaires. (Figure 1.24). Les courbes d'écoulement non linéaires sont divisées en deux groupes : rhéofluidifiants et rhéoépaississants.

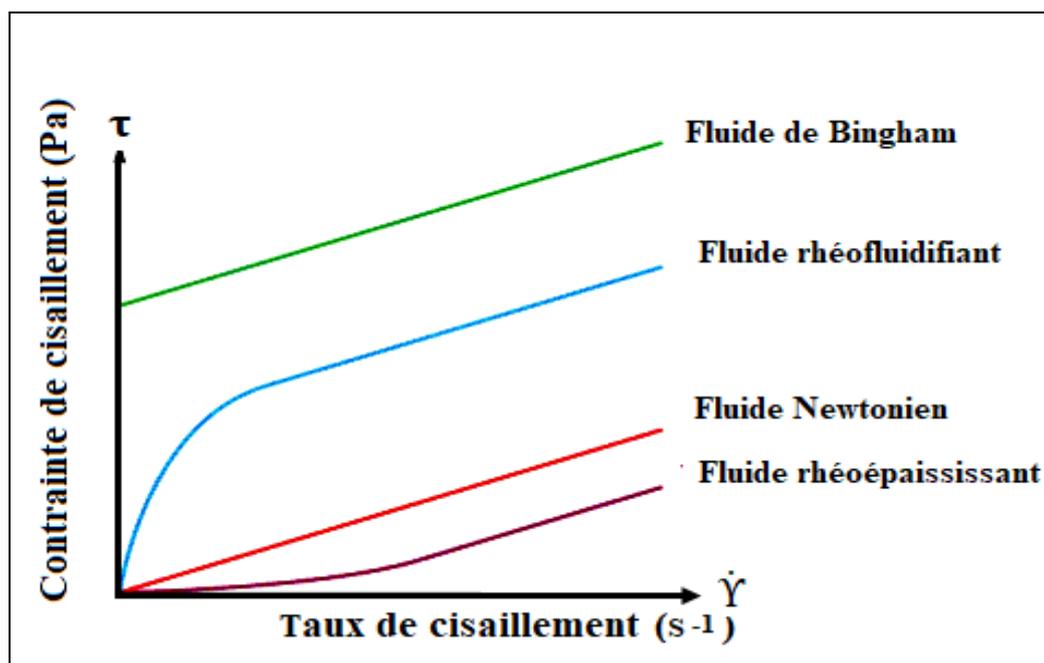


Figure 1.24 : Différents comportements rhéologiques des fluides [110].

Les écoulements linéaires sont représentées par un modèle Newtonien dont les fluides s'écoulent dès qu'une contrainte de cisaillement est appliquée (ils ne possèdent pas de seuil de cisaillement).

Dans ce modèle la viscosité μ (apparente), est constante et le seuil de cisaillement τ_0 est nul.

Cependant, dans le modèle non Newtonien (fluides de Bingham) les fluides nécessitent une contrainte de cisaillement initiale τ_0 pour pouvoir s'écouler. La viscosité (plastique) est constante [110].

Pour un comportement rhéologique non linéaire de type Herschel-Bulkley, la viscosité plastique est la dérivée par rapport au gradient de vitesse de l'équation de la contrainte de cisaillement. Donc la viscosité est variable pour chaque point de la courbe d'écoulement.

Les chercheurs [111-113] montrent que les bétons frais ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Les études [114-116] indiquent que le BAP possède un comportement Binghamien définie par deux facteurs, la viscosité plastique μ , et le seuil d'écoulement τ_0 :

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \dot{\gamma} \quad (1.4)$$

où : τ , τ_0 , $\dot{\gamma}$, μ , est la contrainte de cisaillement (Pa), le seuil de cisaillement (Pa), le gradient de vitesse (s^{-1}) et une constante appelée la viscosité plastique de Bingham (Pa.s). (Figure. 1.25).

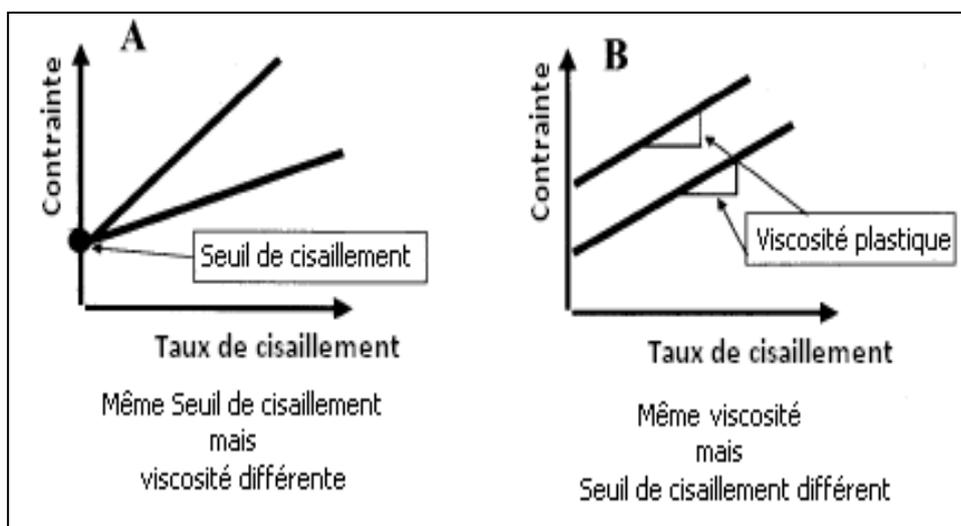


Figure 1.25 : Comportement rhéologique du béton [113].

Cependant, certains auteurs [114-118] rapportent que les bétons autoplaçants ont particulièrement un comportement non linéaire rhéoépaississant, suivant la loi de comportement de type Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + k \times \gamma^n \quad (1.5)$$

Il est noté que pour (n=1), le modèle Binghamien est une variante du modèle Herschel-Bulkley.

d) Différents types de rhéomètres

L'évaluation des paramètres rhéologiques d'un fluide se fait à l'aide d'appareils appelés rhéomètres. Actuellement plusieurs rhéomètres à béton ont été utilisés à savoir :

◆ Rhéomètres agitateurs malaxeurs

- le two-point test est le premier utilisé dans le béton. Il se compose d'un cylindre creux rempli de béton et d'une pale qui tourne à une vitesse contrôlée (figure 1.26). Son rôle est de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. Cet appareil est conçu pour les bétons de grandes maniabilités (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams) [119,120].

- le rhéomètre UBC est commercialisé sous le nom IBB, (Figure 1.27). Son principe de fonctionnement est similaire au Two-point test. Afin d'automatiser le calcul des vitesses et des couples, cet appareil est relié à un ordinateur à l'aide d'un capteur de vitesse et d'une cellule de charge placée sur l'arbre principal. L'IBB a été utilisé avec succès dans des bétons dont l'affaissement au cône d'Abrams dépasse les 20 cm, dans les BAPs, les bétons à hautes performances (BHP), les bétons pompés, aux bétons de fibres, etc [121,122].



Figure .1.26: Rhéomètres « Two-point-test » et « IBB » de gauche à droite [119].

◆ Rhéomètres à cylindres coaxiaux (Figure 1.26)

- le rhéomètre BML (building material learning) est un dispositif rotatif [122] inspiré de l'appareil 'Two-point test', développé par Wallevik et Gjorv. C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux dont le cylindre intérieur est fixe tandis que le cylindre extérieur tourne autour de l'axe à une vitesse angulaire fixe. Cette géométrie permet d'éviter le glissement du matériau à la surface du cylindre. L'essai nécessite une quantité de béton relativement importante au moins 17 litres.

- le rhéomètre Cemagref [123], est un appareil à cylindres coaxiaux avec une rotation du cylindre interne contrairement au BML. Il nécessite une quantité remarquable de béton par rapport aux autres rhéomètres (500 litres). Il a été conçu à l'origine pour la mesure rhéologique des boues et des laves torrentielles (domaine de la géotechnique).



Figure .1.27: Rhéomètres « BML» et « Cemagref » de gauche à droite [123].

◆ Rhéomètres plan-plan

- le rhéomètre BT Rhéom [124,125] est un appareil développé par le LCPC (1991). Il sert à mesurer les propriétés rhéologiques des bétons d'affaissements au cône d'Abrams supérieurs à 100 mm, des bétons autoplaçants avec des granulats de diamètres inférieurs à 25 mm en présence ou non de vibration. (Figure 1.28). Le principe de l'essai consiste à cisailer un échantillon de béton (7 litres environ) entre deux plans horizontaux, sachant que le plan inférieur est fixe tandis que le plan supérieur est en rotation autour d'un axe vertical avec une vitesse angulaire [126, 127].



Figure .1.28 : Rhéomètre BTRHEOM [121].

e) Corrélation entre les paramètres rhéologiques et les essais à l'état frais

Les chercheurs ont montré la possibilité de corrélérer la viscosité au temps d'écoulement mesuré au V-funnel (T_v -funnel), ainsi que le seuil de cisaillement avec l'étalement et le temps de passage à un diamètre de 500mm (T_{500})[129-131] comme illustrée sur la figure 1.29.

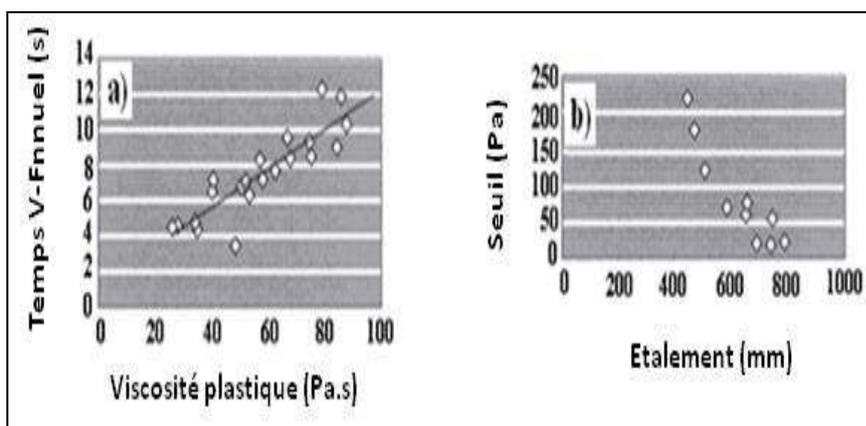


Figure .1.29: Corrélation entre $T_{v\text{funnel}}$ (T_{500}) et la viscosité plastique (a). Etalement au seuil de cisaillement (b) [96].

1.7 Propriétés des BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés. Cependant, les études [132,133] ont montré que les déformations des bétons sont liées à la proportion de granulats qui entre dans leur composition

1.7.1 Propriétés mécaniques

1.7.1.1 Résistance à la compression

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par une résistance à la ségrégation plus élevée et une structure plus compacte. Ces propriétés offrent souvent aux BAP une résistance mécanique plus élevée que celles des bétons ordinaires pour un rapport E/C équivalent [134,135]. Les auteurs [136,137] rapportent que l'incorporation des fillers dans un mélange de béton conduit à une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Cette accélération de la résistance est expliquée par la défloculation des particules fines du filler par les superplastifiants qui favorisent l'hydratation du ciment et conduit à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense (par effet physique principalement). Ce comportement est sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Les chercheurs [138,139] ont montré que l'effet des fillers calcaires sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP est similaire à celles des bétons ordinaires selon la figure 1.30.

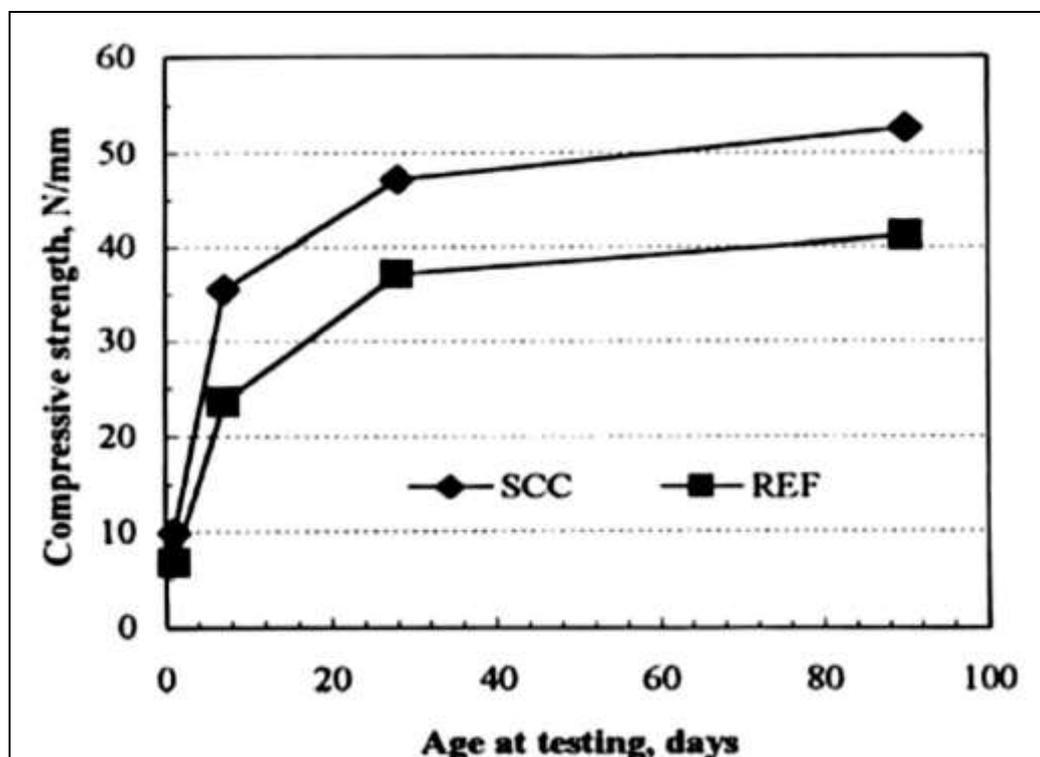


Figure .1.30 : L'effet des fines sur l'évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un béton ordinaire (REF) [140].

De même, Felkoglu et al. [141] affirment que l'augmentation de la résistance est due au taux de finesse des fines calcaires ; cet effet n'est pas remarqué au-delà de 28 jours. Ils trouvent également que l'utilisation des agents de viscosité permet de réduire la résistance mécanique aux jeunes âges.

Une étude comparative entre le BAP et le BO, avec un rapport E/L similaire, montre une augmentation légère de la résistance mécanique du BAP par rapport à celle du BO, à cause du manque de vibration donnant une meilleure interface entre les agrégats et la pâte durcie [142].

1.7.1.2 Résistance à la traction par flexion

Choi .Y et al. [143] ont estimé que la relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction des BAP est similaire à celle donnée par les règlements du béton armé. Cependant, la résistance à la traction est carrément supérieure à celle des bétons vibrés [144]. D'après [145] l'augmentation de la quantité de laitier dans un mélange peut réduire la résistance à la traction des BAP.

1.7.1.3 Module d'élasticité (en compression)

Les chercheurs [134] ont testé des bétons autoplaçants et des bétons vibrés pour des résistances égales et un rapport gravier sur sable G/S fixe ; les résultats trouvés montrent que le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des bétons ordinaires. Cependant, un changement du rapport G/S provoque une réduction du module d'élasticité des BAP par rapport aux BO.

Cela est expliqué par la quantité importante de pâte dans les BAP, dont le module d'élasticité dépend directement des proportions volumiques de ses constituants.

Nassif et al. [146] affirment que le module d'élasticité en compression des BAP est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et dont l'augmentation de la résistance implique un module d'élasticité élevé.

Cependant, certains auteurs ont relié le module d'élasticité au rapport eau/poudre. D'autres études [147] ont constaté que lorsque la résistance est constante, le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne diffèrent pas significativement de ceux du béton ordinaire.

1.7.2 Propriétés physiques

1.7.2.1 Retrait plastique

Le retrait plastique des BAP et béton ordinaire a été examiné par différentes recherches [148]. De même, dans une autre [99], des retraits plastiques, deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés ont été observés (voir figure 1.31). Cependant, Assié [134] a trouvé que pour une même classe de résistance, le retrait plastique est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

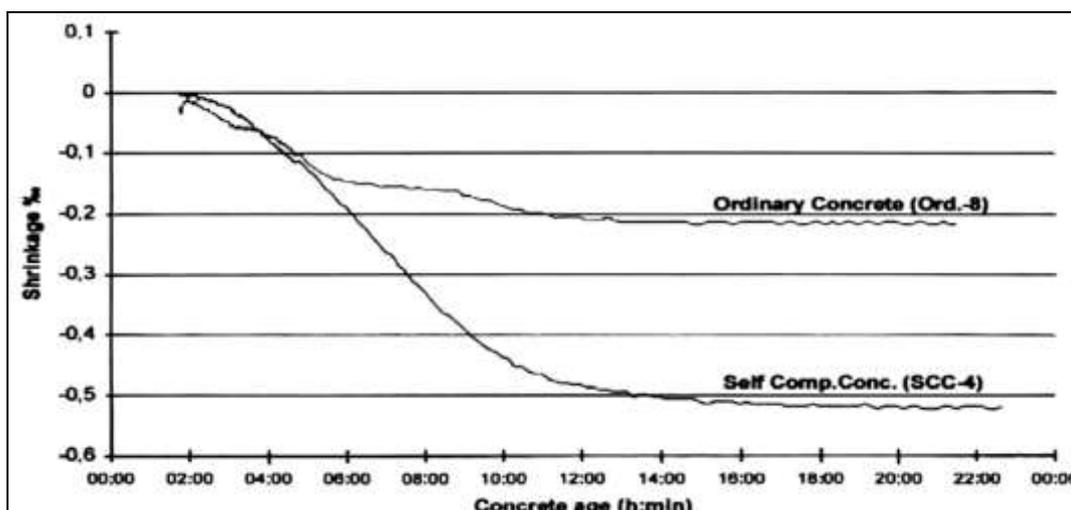


Figure 1.31 : Retrait plastique (comparaison entre BAP et BO) [148].

Pour certains chercheurs [99] le retrait plastique des BAP est près de cinq fois supérieures à celui des bétons ordinaires. (Figure 1.32).

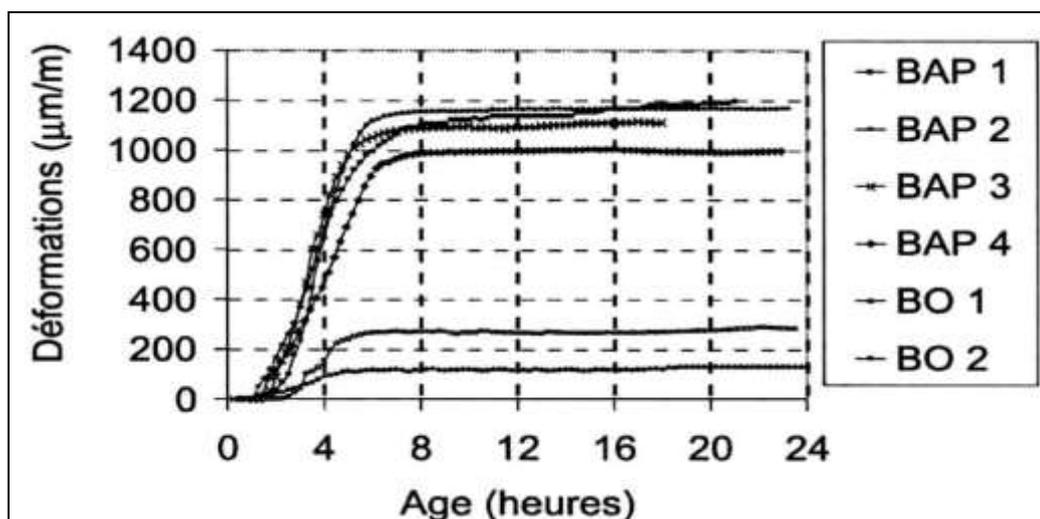


Figure 1.32 : Retrait plastique des BA et BV [99].

1.7.2.2 Retrait endogène

Une étude [134] montre que les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants ont un retrait endogène équivalent à 28 jours, cependant au-delà d'un an, il est remarqué une légère évolution de retrait du BAP par rapport à celui des BO. Cette petite différence est due au volume important de la pâte dans les BAP. D'autres parts, Pons [149], a expliqué cette légère différence de retrait par l'évolution des réactions d'hydratation qui dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs.

Par conséquent, ce retrait chimique va être directement lié au rapport E/C. Pour un grand domaine de résistance, une étude [150] montre que les BAP ont subi des déformations libres (retraits endogènes et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés.

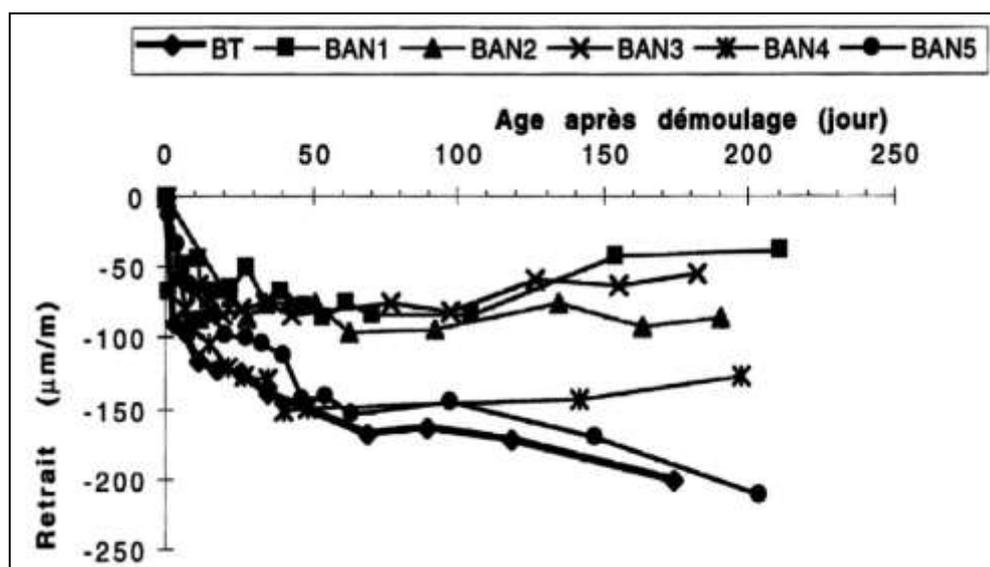


Figure 1.33 : Retrait endogène des BA et BV [150].

1.7.2.3 Retrait de dessiccation

Le phénomène de retrait de dessiccation des BAP ne reste à priori pas bien expliqué. Certaines études [151] remarquent des retraits plus importants pour ces bétons que ceux testés sur des bétons ordinaires. Lorsque le rapport G/S des BAP est élevé, les déformations trouvées sont plus faibles. (Figure 1.34). Cependant d'autres chercheurs, ont trouvé des retraits similaires pour les deux types de béton à résistance mécanique

constante [150]. Selon cette étude la valeur de retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ (à 180 jours).

Le retrait de séchage des BAP est moins important que ceux des bétons vibrés pour une quantité de ciment et un rapport E/C équivalents et un volume de pâte différent.

Or cela est expliqué par l'effet du volume de pâte et par le rapport E/L [152], où l'augmentation du volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution du rapport E/L contribuent à diminuer le retrait de séchage [37].

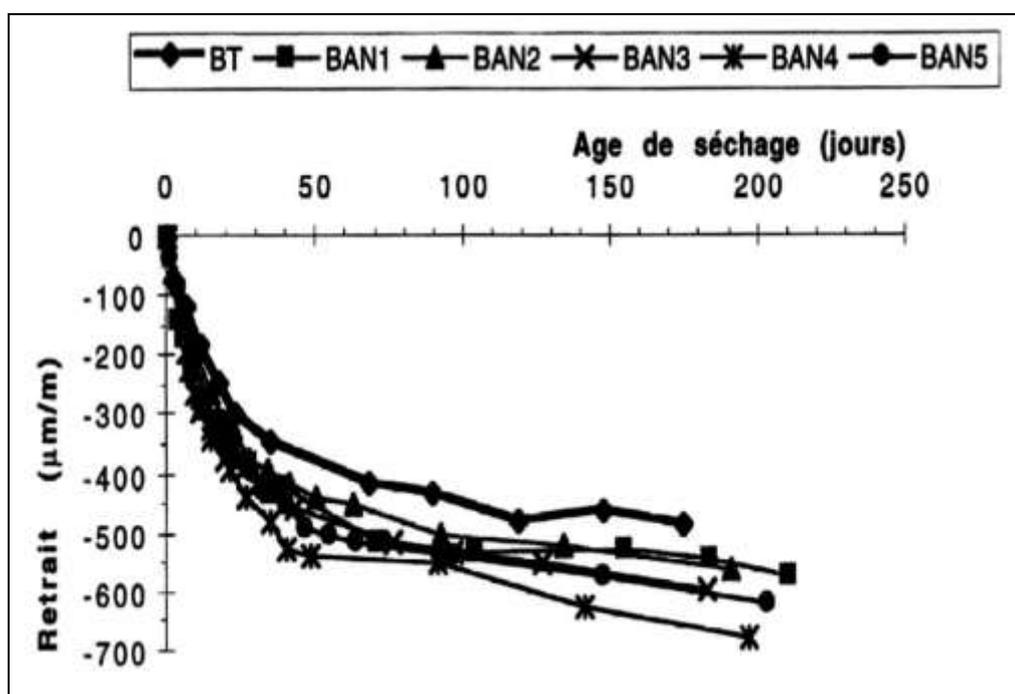


Figure 1.34 : Retrait de dessiccation des BA et BO [154].

1.7.2.4 Fluage (Déformations sous charges)

Les auteurs [153] montrent que les déformations sous charge des BAP varient d'une formulation à l'autre, (Voir Figure 1.35). En général, les BAP sont sujets à des déformations différées similaires ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés. L'amplitude de déformation peut différer d'un type de béton à l'autre, cependant, l'effet de la pâte sur le développement des déformations différées ne semble pas avéré.

Les études [147, 154,155] montrent que les BAP ont un comportement différé sous une charge équivalent à ceux des bétons ordinaires quel que soit le mode de conservation.

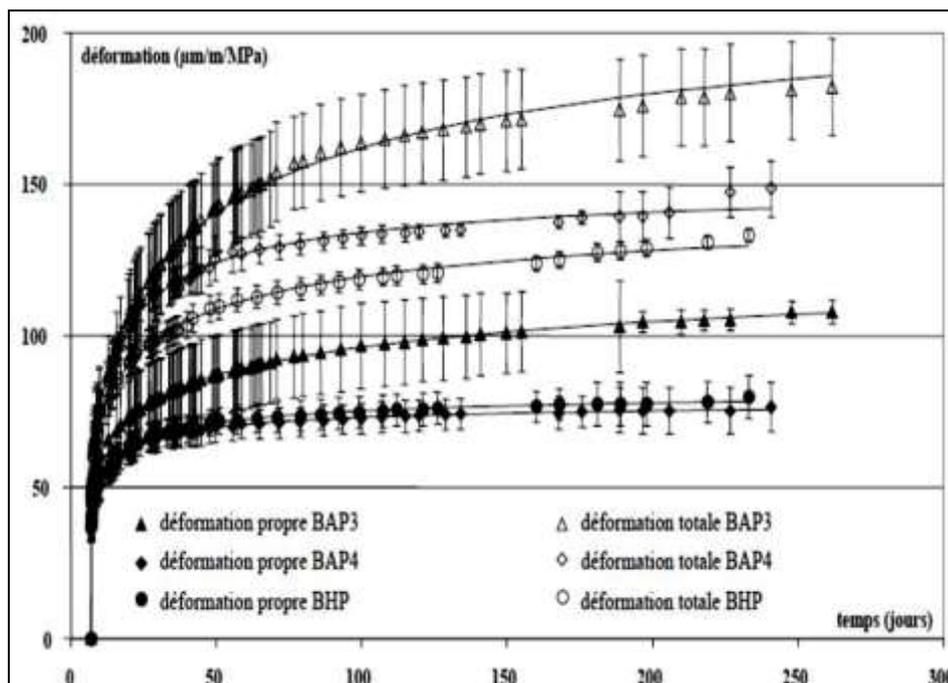


Figure 1.35: Déformations différées pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa [153].

1.8 Conclusion

Cette étude a fait le point sur les concepts relatifs aux BAP par le biais d'une présentation approfondie sur les caractéristiques et les propriétés des BAP à l'état frais et durci ainsi que leurs méthodes de formulations.

Les informations récoltées dans cette partie, montrent que les BAP ont un comportement différent, par rapport aux bétons vibrés, à l'état frais et un comportement similaires à l'état durci. Elles ont également montré que la formulation du BAP est une tâche plus compliquée car elle fait appel à plusieurs paramètres, ce qui impose un bon choix des matériaux constituant le BAP.

CHAPITRE 2

SABLE DE CONCASSAGE ET DURABILITE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DE SABLE DE CONCASSAGE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les sables de concassage, notamment leur utilisation dans la confection des bétons et des mortiers. L'effet des fines calcaires issues de sable de concassage sur les performances du béton à l'état frais et durci sera discuté ainsi que les propriétés de durabilité.

2.2 Notions générales sur le sable de concassage

La demande du marché des granulats dans le secteur de la construction est élevée en Algérie, avec les programmes gouvernementaux axés sur les travaux publics tels que les programmes de logement, les infrastructures routières et autoroutières, ainsi que le secteur ferroviaire.

Les sables de carrière (concassage), résultant du concassage des calcaires, granodiorite, andésite, granite, dolomie et basalte, sont des granulats concassés anguleux. Ils diffèrent des sables naturels dans la granulométrie, la forme, la texture des particules ; et la quantité de fines, à priori entre 10 % et 20 % de fines. Actuellement en Algérie, les sables de concassage, par leur méconnaissance (absence de normes ou de règles qui définissent leurs caractéristiques ainsi que leur limite d'emploi), sont moins demandés par rapport aux sables d'oued ou de mer, ce qui contribue à un fort épuisement des ressources et porte des impacts néfastes sur l'environnement. Devant ce constat, le Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB) a été chargé, par la Commission Technique Permanente du ministère de l'habitat et de l'urbanisme (CTP), de mener des travaux de recherche permettant la valorisation des sables de concassage fabriqués, par le potentiel national de production, pour la confection des mortiers et bétons.

En Algérie, depuis l'élaboration de la loi organisant l'usage des sables de concassage dans le bâtiment [162], la production de sable concassé est en croissance continue. Une augmentation de la production de 2.72 millions de m³ de sable concassé produits en 2005 à 13.36 millions de m³ en 2009 a été enregistrée (Figure 2.1). Le secteur privé

produit 8846174 m³ de sable concassé représentant 66.2% de la production totale, contre 4514067 m³ réalisés par le secteur public, soit 33.8%. (Figure 2.2).

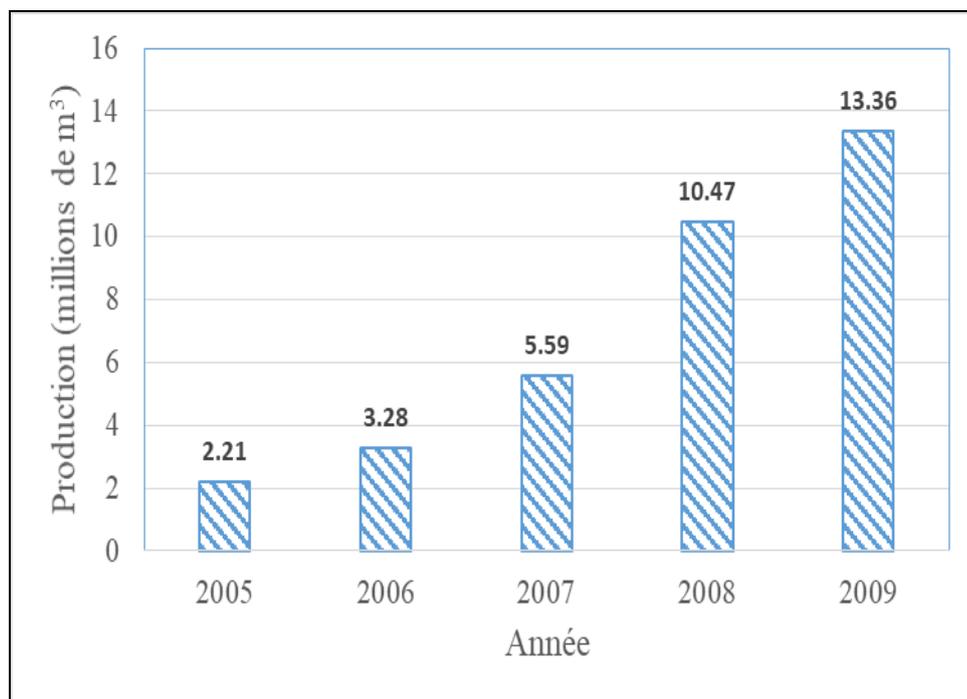


Figure 2.1: Développement de la production du sable de concassage en Algérie [162].

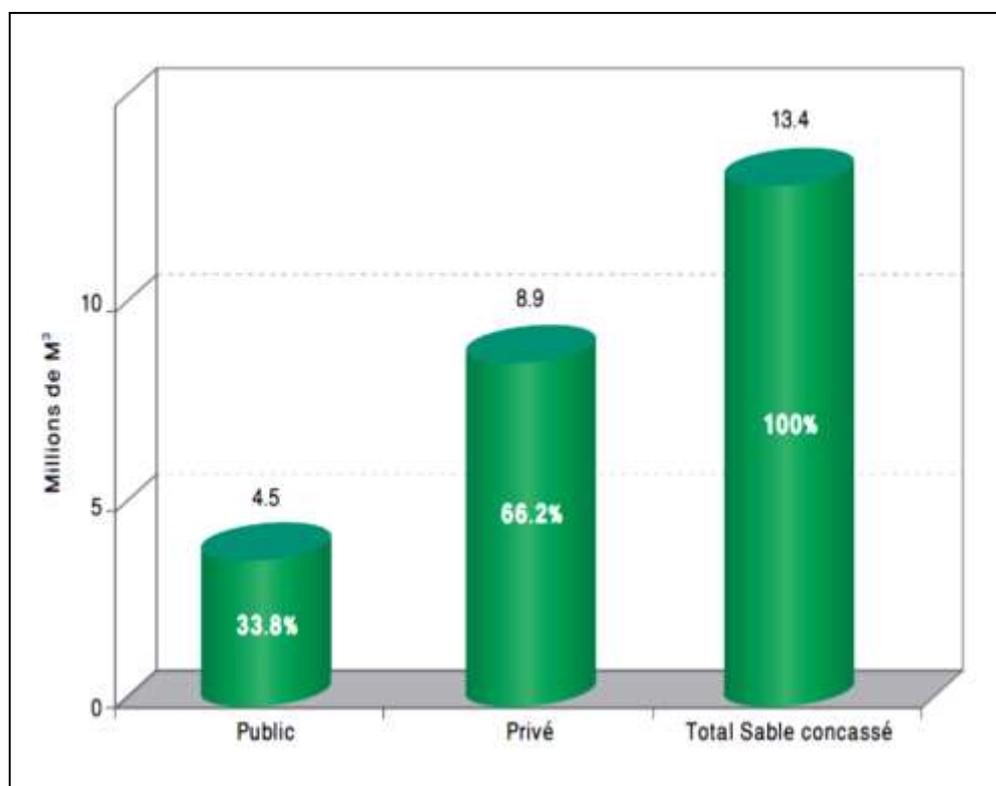


Figure 2.2: Production des sables de concassage par secteur [163].

2.3 Emploi du sable de concassage dans la confection du béton autoplaçant

L'utilisation des fillers calcaires dans la fabrication du béton ordinaire reste limitée car ils augmentent la demande en eau et réduisent concomitamment la résistance. Cependant, dans les BAP, ces fines peuvent être incorporées en masse car la fluidité est maintenue grâce à l'utilisation d'un superplastifiant. L'emploi du sable de concassage dans la composition des BAP offre des performances rhéologiques convenables lorsque la composition est ajustée. Un taux élevé en fines est nécessaire pour empêcher les frottements inter granulaires, ainsi que des dosages en eau et en superplastifiant sont préconisés pour limiter les risques de ségrégation et de ressuage.

En outre ces fines peuvent réduire le coût des BAP et diminuer les problèmes de stockage et d'environnement [173,174]. En effet, les fillers calcaires provenant du concassage des granulats ont une influence positive sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

Nombre de travaux de recherches [174-178] ont montré que les fines calcaires, issues du sable de concassage, réduisent le dosage en superplastifiant tout en maintenant une fluidité fixe, et à priori augmentent la maniabilité des BAP.

Felekoglu et al. [23] ont fait une comparaison entre un BAP à base de sables riches en fines calcaires et autre sans. A cet effet quatre (04) types de sable ont été utilisés. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différentes teneurs en fines afin d'évaluer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Les résultats obtenus montrent que les BAP, formulés avec du sable concassé contenant des fines, présentent de meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression par rapport à ceux préparés avec d'autres sables. Une recherche traitant la possibilité d'utiliser les calcaires de carrière pour développer des BAP économiques a été menée au Canada [179]. Les résultats trouvés jugent que le remplacement partiel du sable par 50% en masse de fines de carrière réduit le coût des BAP sans aucune incidence sur la résistance à la compression, ainsi que cette dernière diminue au jeune âge mais augmente à long terme. El Hilali [180] affirme que l'incorporation de fillers calcaires, de surface spécifique Blaine élevée participe à l'amélioration de la fluidité et de la compacité des BAP. Par ailleurs, la finesse des fines influence particulièrement la demande en superplastifiant (SP) et participe à la diminution de l'ouvrabilité des BAP.

2.4 Effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton

L'influence du sable calcaire concassé sur les performances des bétons à l'état frais a fait l'objet de plusieurs recherches dans le monde. Certaines recherches [164] ont trouvé que l'incorporation de 5 à 10% de fines calcaires améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton. L'effet des fines calcaires sur les performances du béton a été étudié [165], trois mélanges de bétons ont été préparés avec deux types de fines (calcaire et siliceuse), avec des taux de fine de 0, 5, 10, 15 et 20% comme substitution du sable, un rapport E/C de 0.61, 0.62, 0.64 et 0.66 pour des teneurs de fines calcaires respectivement 0, 10, 15 et 20%. Les résultats trouvés montrent que la demande en eau augmente avec l'augmentation des pourcentages des fines dans le béton comme l'indique la figure 2.3.

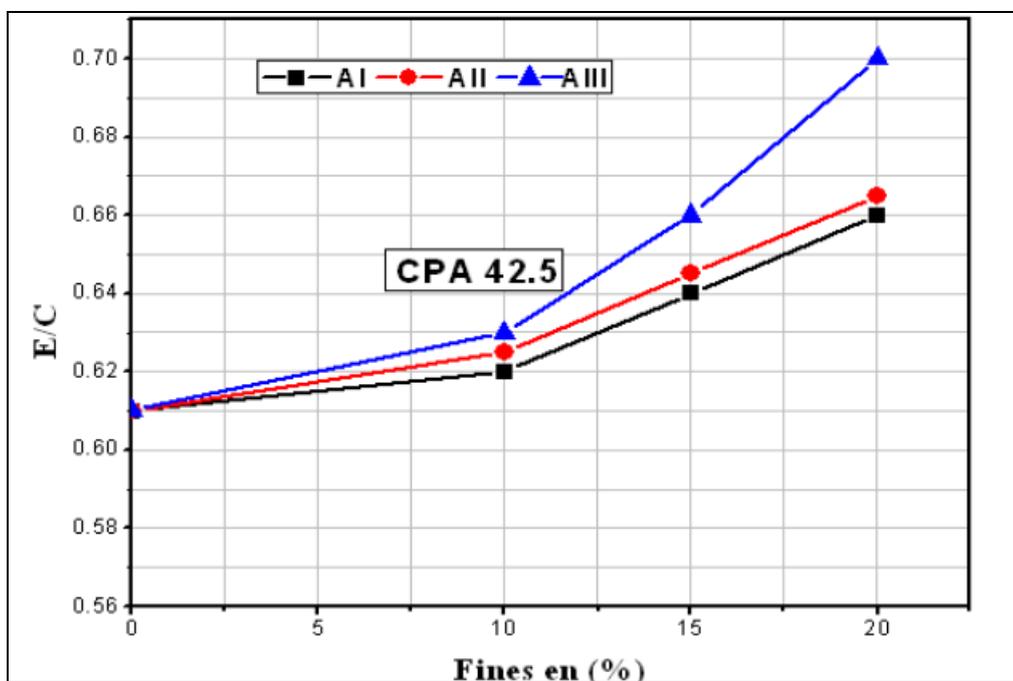


Figure 2.3: Effet de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines [164].

Cependant, cette augmentation de la demande en eau est due principalement à l'augmentation de la porosité des bétons avec l'accroissement des fines calcaires, et aussi à la surface spécifique des grains de sable de concassage utilisés qui présentent des faces fraîchement rompues induisant toujours une porosité systématique donnant lieu à une grande absorption de l'eau.

Des essais ont été menés par Kenai et al. [166] dont l'objectif d'étudier l'ouvrabilité du béton à base de trois sables de concassage avec 0, 10, 15 et 20% de fines. Les résultats trouvés ont montré que l'addition des fines contribue à l'augmentation de l'ouvrabilité

du béton. Cependant, cette augmentation est due à la grande surface spécifique des fillers, à la morphologie de leur texture et à leurs surfaces rugueuses.

Westerholm et al. [237] ont examiné l'influence de la teneur en fines calcaires issues de sable de concassage sur les caractéristiques rhéologiques des mortiers. Les résultats trouvés montrent que la contrainte du seuil d'écoulement des mortiers augmente linéairement à partir des taux de fines supérieurs à 16% (Figure 2.4a). De ce fait, la demande en eau des mortiers augmente en raison de la variation de la surface totale des agrégats fins. Selon la figure 2.4b, on peut remarquer que la relation entre la teneur en fines et la viscosité plastique des mortiers semble être plus compliquée.

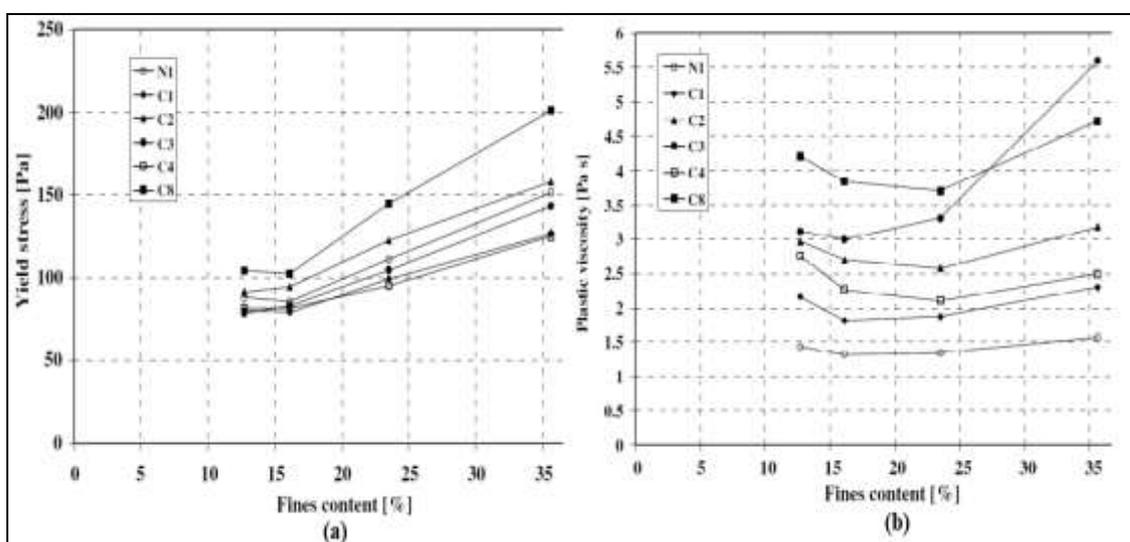


Figure 2.4: Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité en fonction de la teneur en fines dans le sable [237].

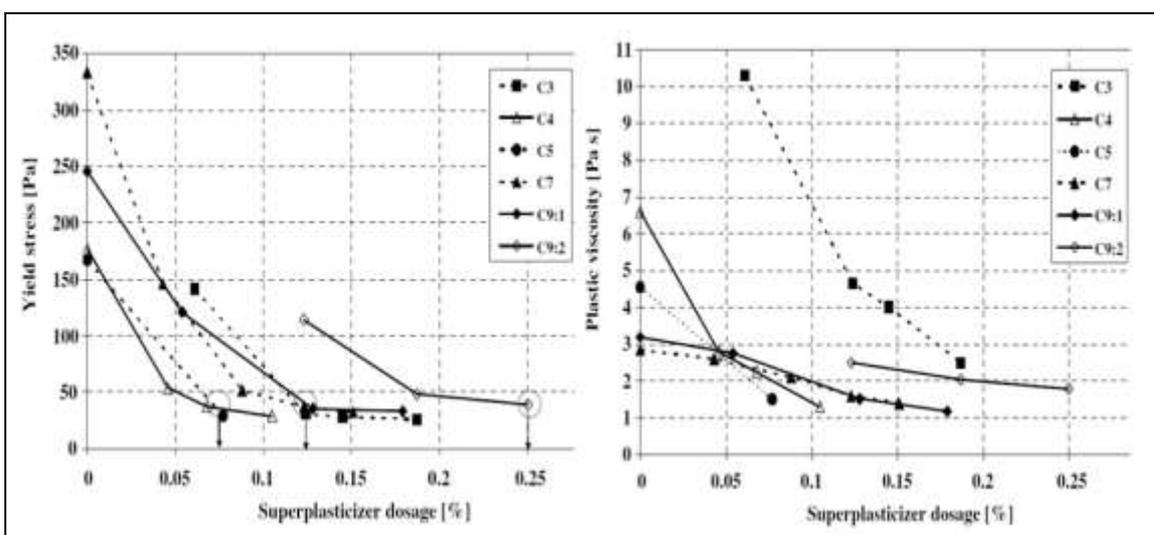


Figure 2.5: Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité plastique des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant [237].

Les chercheurs [237], ont montré que les paramètres rhéologiques des mortiers à base de sable de concassage ont été légèrement plus élevés et dans certains cas bien supérieurs 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 2.5). De Larrard [84], a montré que l'effet accélérateur des fillers calcaires peut contrôler 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. Les résultats obtenus par Nehdi [255], montre que pour une teneur des fines inférieure à 10%, l'accroissement de la surface spécifique affecte la contrainte seuil, mais améliore la viscosité plastique (Figure 2.6).

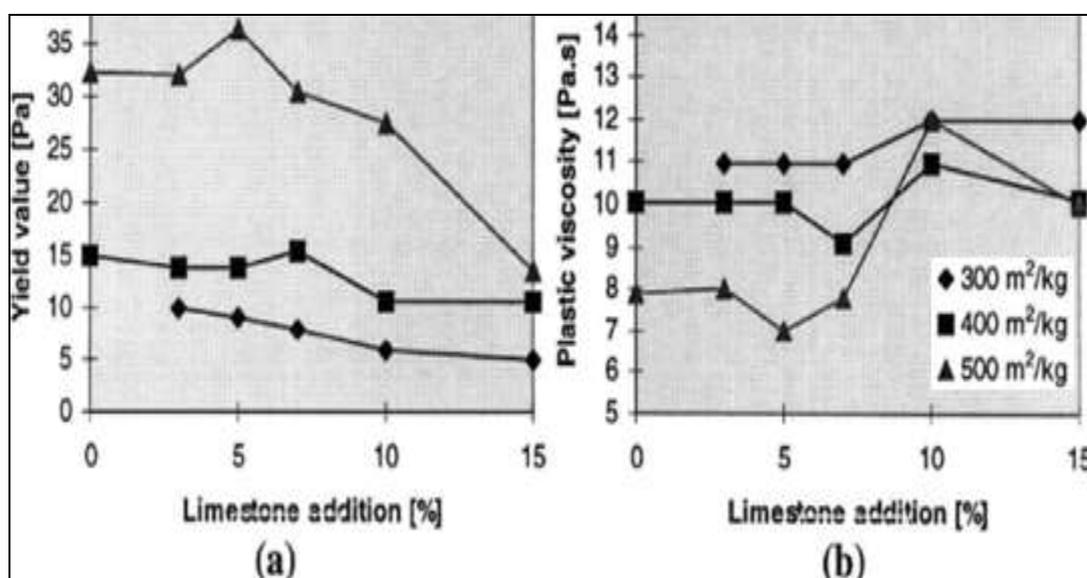


Figure 2.6: Evolution des propriétés rhéologiques en fonction de la surface spécifique et de teneur en fines [255].

Esping [256] a trouvé que 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 2.7). 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 [256]. Nehdi [257] a rapporté que, Brookbanks a remarqué une légère diminution du temps de prise pour une augmentation de la teneur d'addition des fines calcaires.

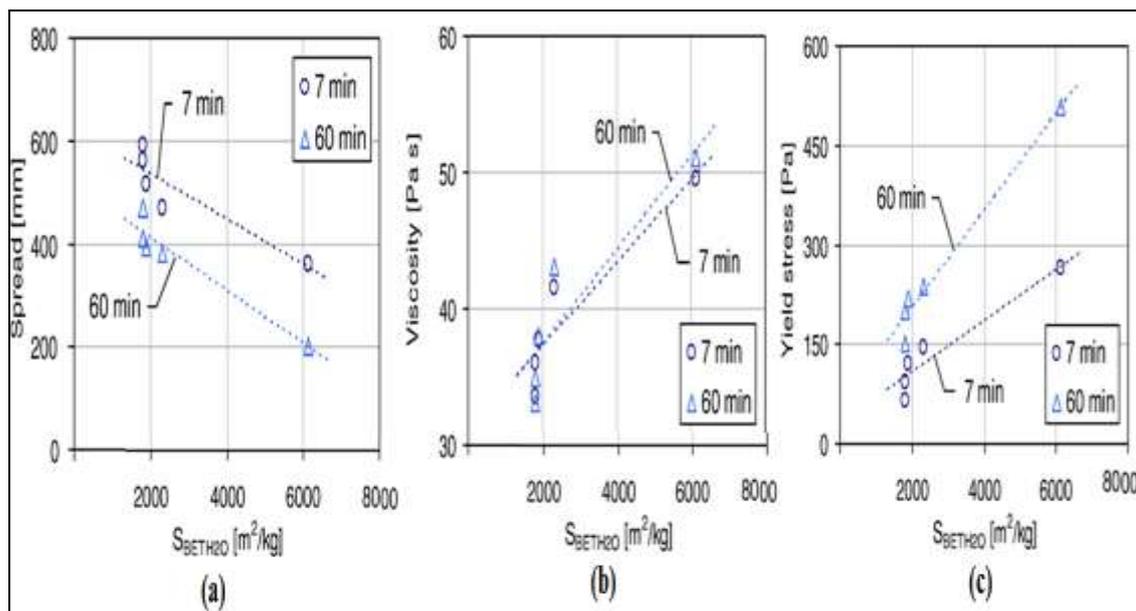


Figure 2.7: Evolution de a) l'étalement b) la viscosité et c) le seuil de cisaillement en fonction de la surface spécifique [256].

Les fillers calcaires ont diminué largement la demande en eau. Par contre, Ghezal a trouvé que les BAP contenant du ciment portland ordinaire, la fumée de silice et des fines calcaires présentent des pertes rapides de slump. Bien que ces mélanges ont initialement requis un petit dosage de superplastifiant et ont donné des bonnes propriétés rhéologiques par rapport à ceux de contrôle, ils ont été rejetés car ils n'ont pu pas maintenir leur ouvrabilité dans le temps. Pour cela, Nehdi [257] a signalé que les fillers calcaires contribuent à la production de béton fluide.

Une étude menée par Soualhi et al. [258], traitant l'influence des types d'additions minérales sur les propriétés rhéologiques des mélanges de béton, a montré que l'augmentation du taux de substitution des fines calcaires (436 m^2/kg), conduit à une augmentation de la viscosité plastique du béton, et que le dosage de saturation des fines calcaires est d'environ 30%. Cependant, Benaïcha et al. [259] ont montré que la substitution du ciment (475 m^2/kg) par les fines calcaires (555 m^2/kg) a un effet favorable sur la fluidité du coulis, en diminuant son temps d'écoulement et sa viscosité.

R. Yang et al. [167] ont étudié l'effet du sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton de hautes performances. Les résultats trouvés montre que la fluidité du BHP a été réduite de façon continue avec l'augmentation du pourcentage de substitution du SC par les fines calcaires par rapport à l'échantillon de référence, en plus, la fluidité a été diminuée, de 11,7% lorsque le taux de remplacement, (0-1,25 mm), été de 50% et, elle

n'a été diminuée que de 5,0% lorsque les rapports de substitution, (0,6-1,25 mm), étaient de 50% (Figure 2.8).

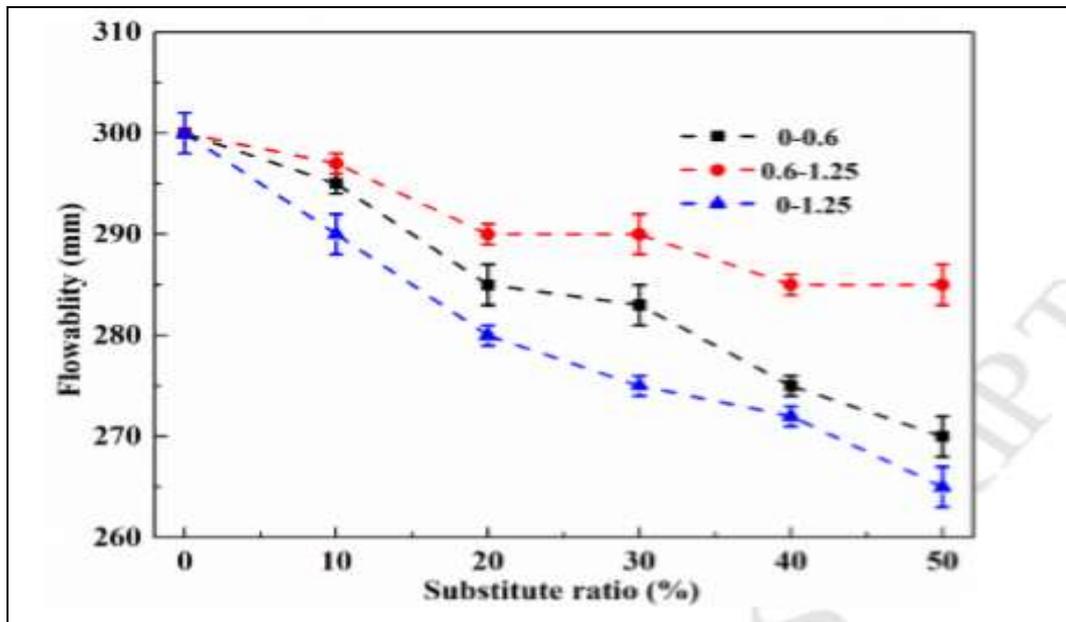


Figure 2.8: Effet des taux de fines sur l'ouvrabilité du BHP [167].

L'effet des différents types de sable sur les propriétés du BAP a été examiné par Bouziani [254]. En effet, une méthode de modélisation du mélange a été proposée 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 et la ségrégation des BAP. Les résultats obtenus, ont montré 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 remarqué 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.

Benabed et al. [30-260], ont fait des études sur l'influence du type de sable sur le comportement 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 2.9). 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.

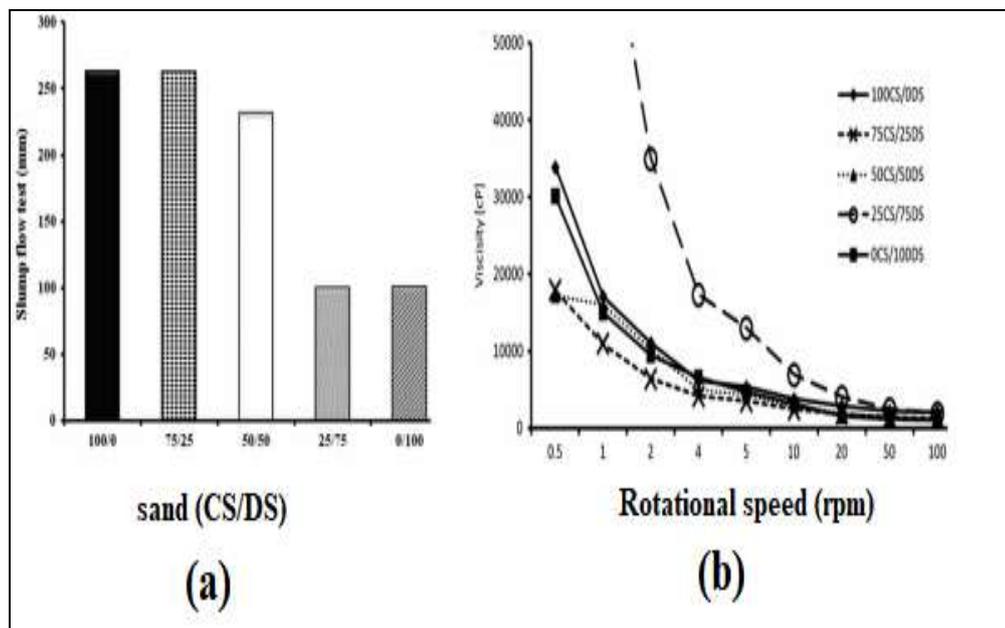


Figure 2.9: Effet de la teneur en DS sur a) le mini-slump et b) les mesures de la viscosité, des mortiers à base de sable binaire (CS / DS) [260].

Safidine et al. [261] ont examiné l'influence des fines calcaires (LCSD) issues de sable concassé calcaire la sur les propriétés rhéologiques du mortier de ciment à base de sable concassé (CS) de nature minéralogique différente (calcaire et siliceux). Un LCSD avec une BET de surface spécifique de 1470 m²/kg a été utilisé pour le remplacement de contenu différent par une masse de sable (0, 5, 10, 15 et 20 %). Le rapport eau-ciment (W/C) et la teneur en ciment ont été maintenus constants pour tous les mélanges. Les résultats montrent que l'affaissement a diminué ainsi que le temps d'écoulement, la contrainte d'élasticité et la viscosité du mortier ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en LCSD. Ainsi, le mortier à base de sable concassé de calcaire (LS) a une faible perte de propriétés rhéologiques par rapport à un mortier à base de sable concassé siliceux (SS)(Figure 2.10). Skender et al. [262] ont étudié l'effet de la teneur en fines comme remplacement partiel du sable concassé ou du ciment sur les performances rhéologique des BAP. A cet effet, 11 échantillons de mélanges de BAP ont été préparé en deux séries, chacune avec une substitution de taux (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 %) de sable et de ciment par les fines calcaires.

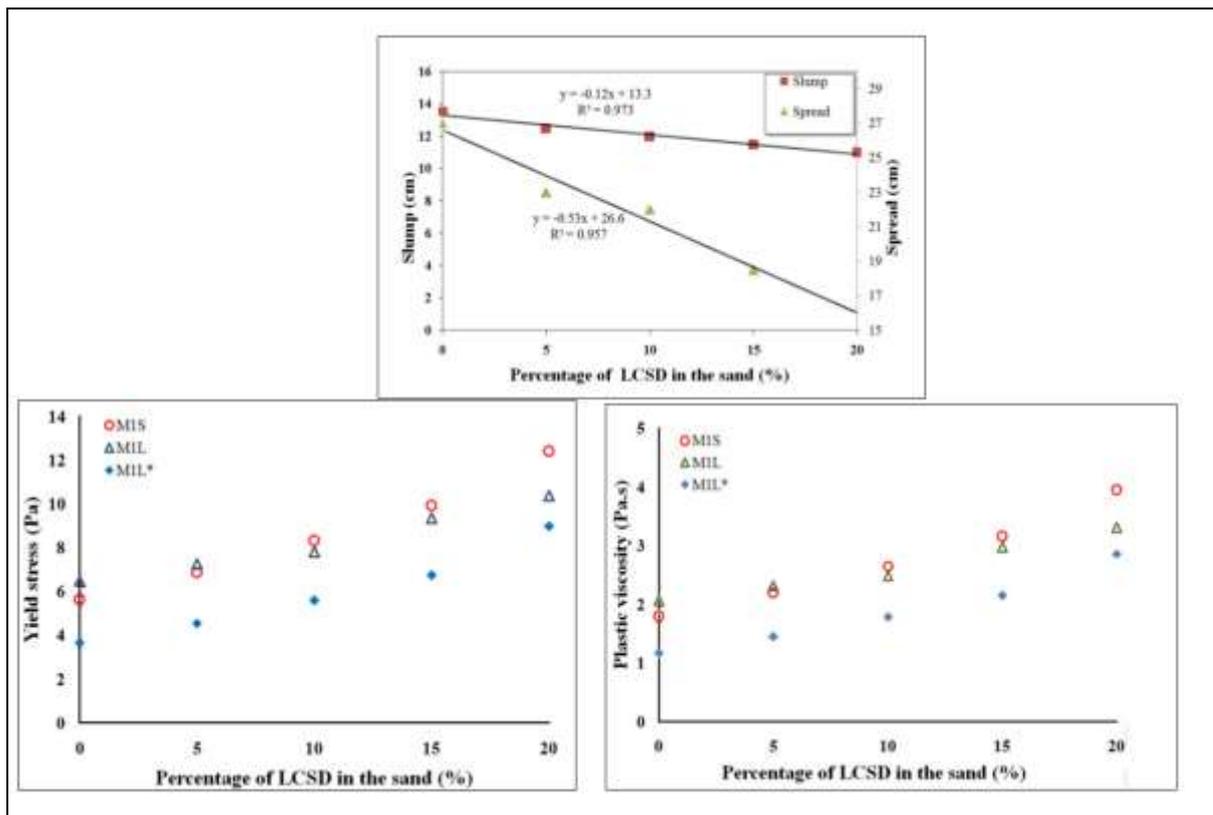


Figure 2.10: influence des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques des mortiers [261].

Les résultats trouvés montrent que l'étalement a diminué avec l'augmentation de la teneur en FC dans les deux cas de substitution (sable et ciment), tandis que le temps d'écoulement T500 et le temps d'écoulement de l'entonnoir en V ont augmenté. Ainsi qu'avec le même rapport E/L, presque tous les BAP présentaient des rapports de hauteur de boîte en L supérieurs à 0,8, sauf pour les mélanges contenant 25 % de FC comme remplacement de ciment ou de sable (Figure 2.11).

Dans le but de connaître le taux optimal d'utilisation des fines calcaires dans les mélanges cimentaires, des recherches ont été réalisées [168-170]. Cependant, des recherches ont porté sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fines calcaires [171] [172].

L'objectif de ces études est de définir la limite admise du taux de fines calcaires dans le sable de concassage. Ces recherches ont montré la possibilité d'utiliser un béton avec un sable concassé de 15% de fines calcaires.

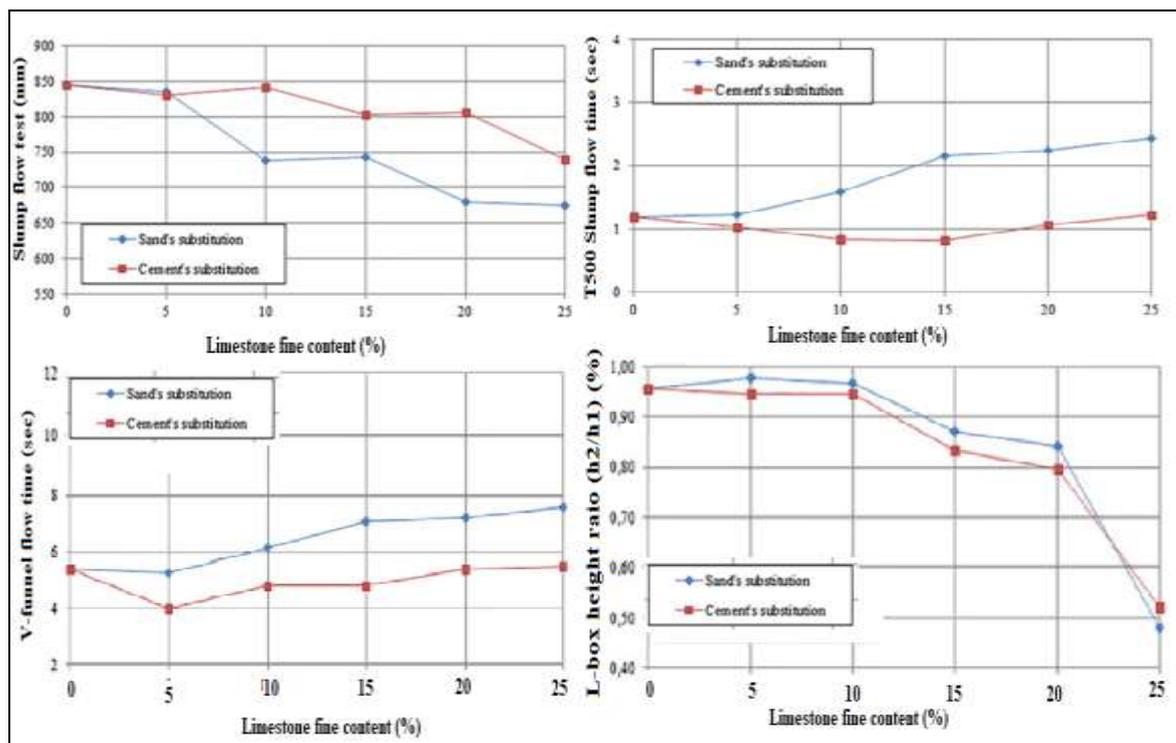


Figure 2.11: Effet des fines calcaires sur le comportement l'ouvrabilité du BAP [262].

2.5 Influence du sable de concassage sur les propriétés mécaniques du béton

L'étude de l'influence des fines calcaires, issues de sable de concassage, sur le comportement du béton est devenue le souci de plusieurs chercheurs. La possibilité d'employer des granulats concassés dans la confection des bétons, a été étudiée depuis les années 1984.

Les auteurs ont montré que les fines calcaires permettent de confectionner des bétons de caractéristiques satisfaisantes comparables à celles de bétons à base de granulats silico-calcaires ou siliceux [156]. Cependant, l'utilisation des fines améliore les performances mécaniques du béton grâce à leur rôle actif dans l'hydratation du ciment, et l'ajout de filler calcaire, jusqu'à 15%, diminue l'absorption des bétons [157].

D'autres études réalisées sur mortier à porosité constante, ont montré que le mortier à base de calcaire est plus résistant qu'un mortier siliceux. Bachiorrini et al. [158] ont constaté que l'utilisation des graviers et des sables calcaires concassés (10 à 20% de fines), dans la confection des bétons hydrauliques, améliore les caractéristiques physiques et mécaniques en comparaison à celle des granulats alluvionnaires. En outre, les essais réalisés sur mortier montrent que l'incorporation des fines dans le sable contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques de tous les échantillons étudiés.

Celik et Marar, [159], ont étudié l'effet du taux de filler concassée sur les performances des bétons, dans lesquels le sable a été partiellement remplacé par 5, 10, 15, 20, 25 et 30% de fines. Les résultats obtenus (Figure 2.12) montrent que l'augmentation de la teneur de filler augmente le volume d'air, diminue l'affaissement, augmente la résistance à la compression pour des taux de fines inférieures à 10%. Par contre, on note une diminution au-delà de 10%.

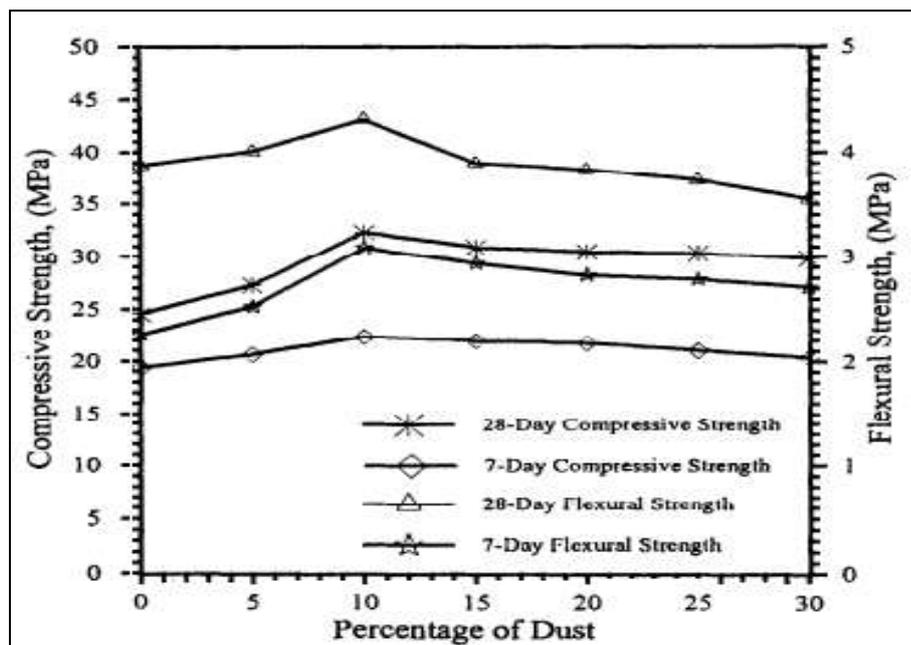


Figure 2.12: Effet de la teneur des fines sur les performances mécaniques des bétons [159].

Beixing et al. [160] ont montré la possibilité d'utiliser un sable de concassage de teneur en fine calcaires allant de 10 à 20 % est sans aucune incidence sur les propriétés physiques et mécaniques du béton. Les résultats obtenus à l'état frais montrent que la densité réelle du béton augmente rapidement lorsque le taux de fines passe de 0 à 15% et au-delà elle diminue. En outre, les fines confèrent au béton frais une certaine cohésion et une aptitude de rétention d'eau qui permet le maintien de l'homogénéité en s'opposant au ressuage et à la ségrégation.

Donza H et al. [161] ont trouvé que les bétons à base de sable de concassage présentent des performances élevées par rapport aux bétons de sable naturel. Cependant, la résistance à la compression est liée à la résistance du mortier (Figure 2.13).

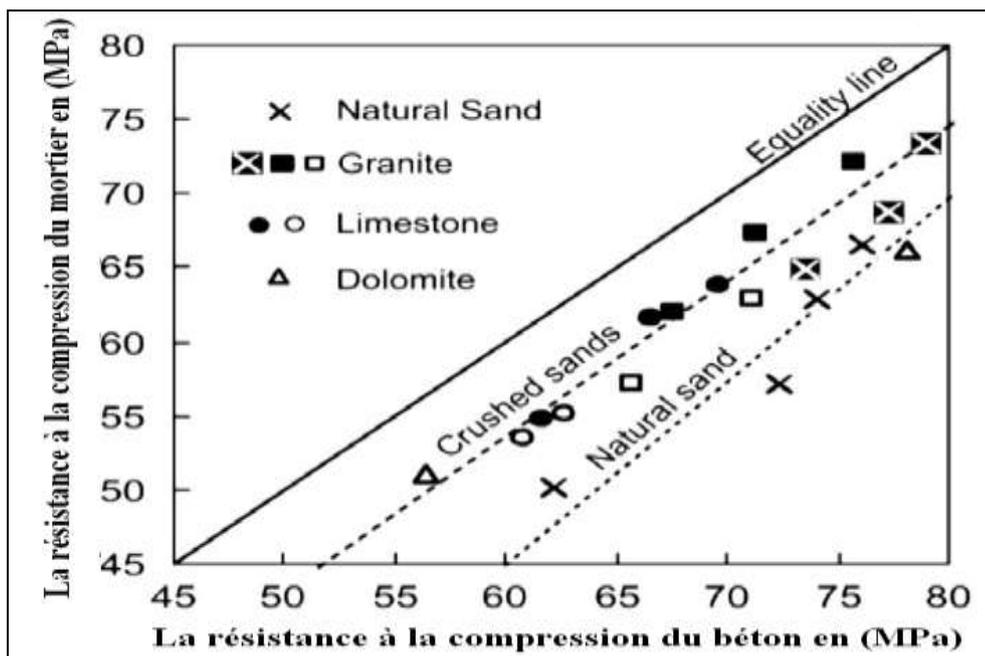


Figure 2.13: Relation entre la résistance à la compression du béton et la résistance du mortier [161].

Les études [262] ont montré que l'influence de fines calcaires (LF) sur le BAP semble avoir des effets négatifs aux premiers âges pour les deux remplacements du sable concasse ou du ciment par les fines (LF). Lorsque le pourcentage de LF dans le BAP augmente, une diminution de la résistance à la compression est constatée à 7 jours jusqu'à atteindre les valeurs les plus basses de 48,51 et 42,77 MPa obtenues pour SCC6 (substitution de sable à 25%) et SCC11 (substitution de ciment à 25%), respectivement. Cependant, au-delà de 28 jours, une augmentation de la résistance à la compression est enregistrée pour les échantillons ayant 5%, 10% et 15% de la teneur en LF comme substitution partielle de sable, et les valeurs de résistance les plus élevées à 180 jours enregistrées pour SCC2, SCC3 et SCC4 avec 5%, 10% et 15% sont respectivement 87,48, 87,41 et 86,75 MPa. Il convient de noter qu'environ 12% d'amélioration de la qualité du béton a été obtenu par rapport à la référence (Figures 2.14 et 2.15).

Les résultats rapportés dans ce document proviennent d'une étude de neuf mélanges de BAP. Le volume de pâte a varié entre 291 et 457 l/m³. Un des mélanges avait déjà été utilisé dans un essai à grande échelle, et les autres ont été conçus en fonction de plusieurs paramètres du mélange de béton de référence (Figure 2.16). La résistance mécanique à la compression, le module d'élasticité, le retrait, et la perte de masse ont été mesurés.

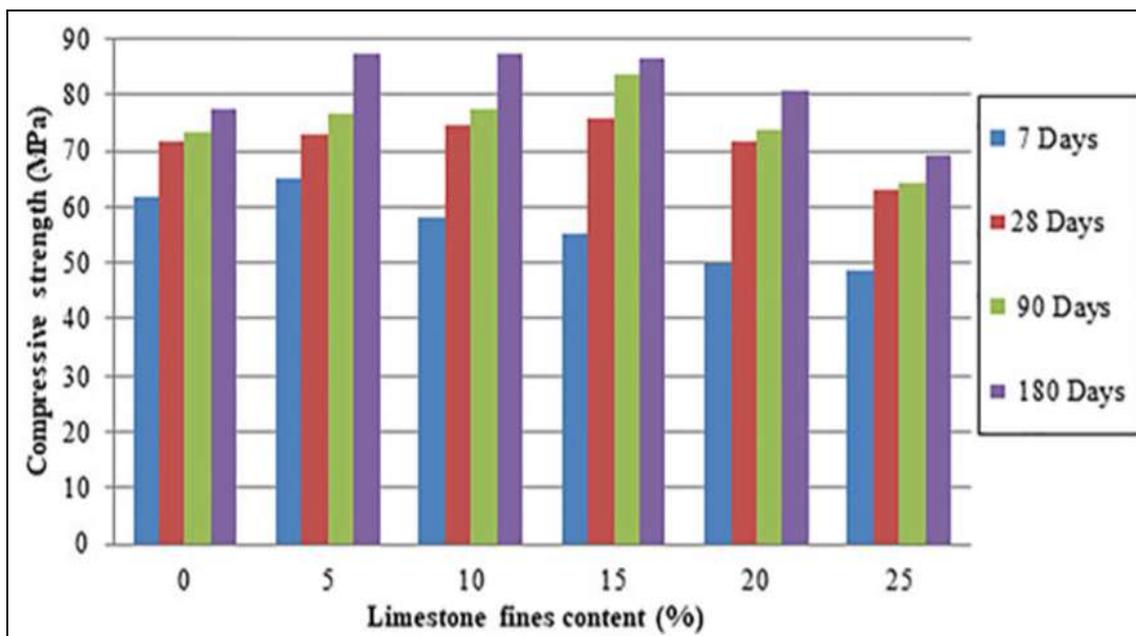


Figure 2.14 : Résistance à la compression en fonction du % de LF comme remplacement partiel du sable de concassage [262].

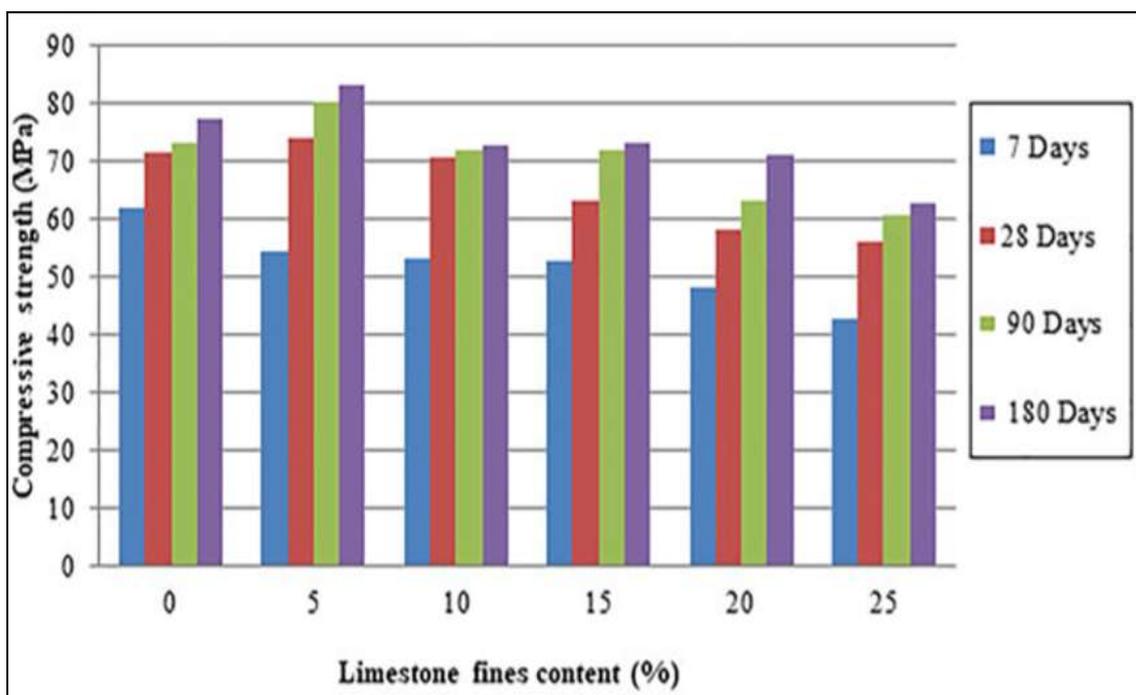


Figure 2.15: Résistance à la compression en fonction du % de LF comme remplacement partiel du ciment [262].

D'après les résultats expérimentaux, La résistance à la compression et le module élastique diminuent légèrement avec l'augmentation de la teneur en pâte, ainsi que le volume de pâte provoque une augmentation du retrait et de la perte de masse [263].

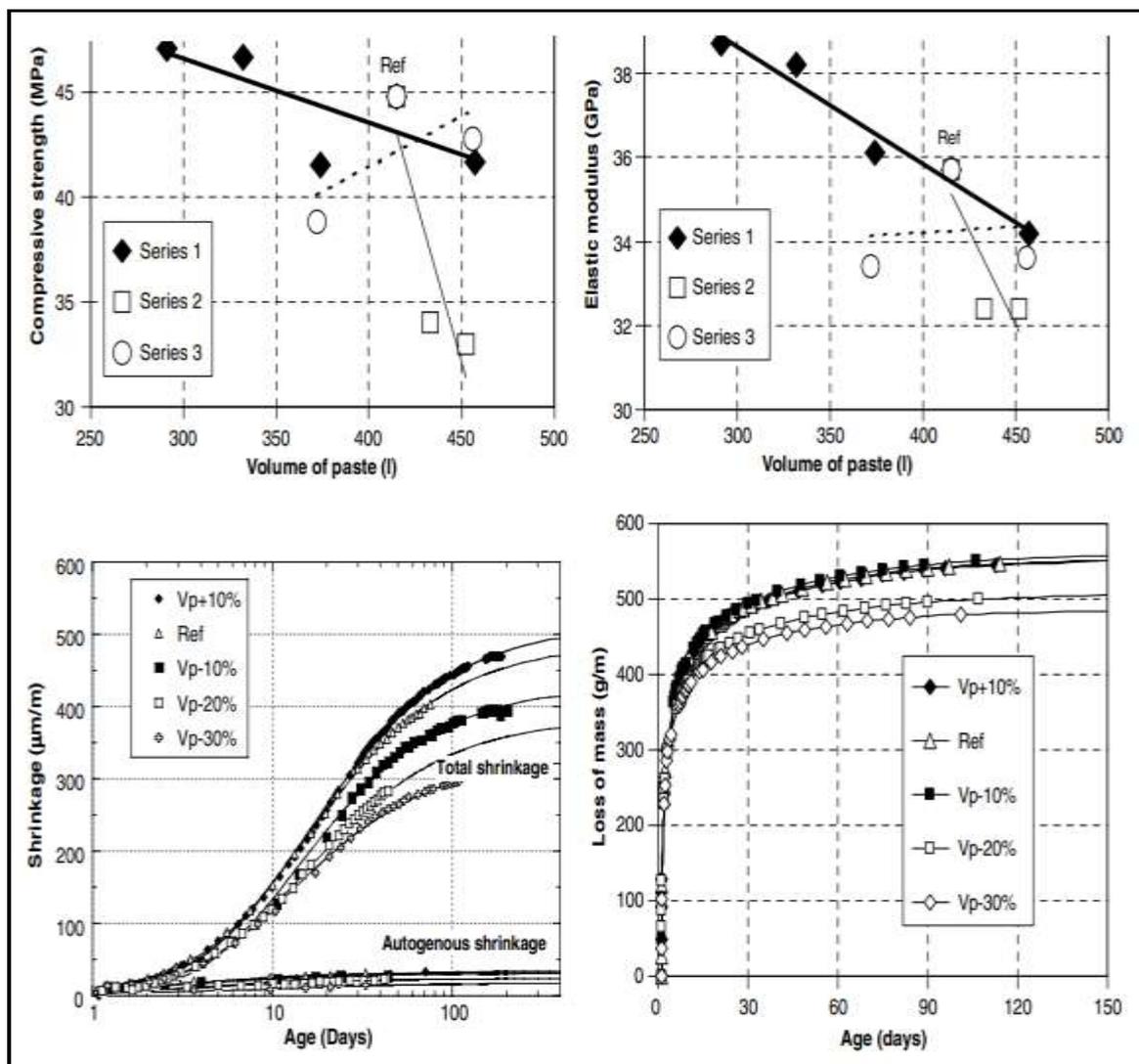


Figure 2.16 : Effet de la pâte sur les propriétés mécaniques et physiques du BAP [263]

2.6 Durabilité des BAP à base de sable de concassage

Il se trouve que les ouvrages ne vieillissent pas seulement du fait de l'exercice de leur fonction, mais aussi du fait de l'action qu'exerce sur eux l'environnement dans lequel ils se trouvent. La durabilité d'un ouvrage en béton est liée en général à sa perméabilité. L'ouvrage et son matériau doivent donc être adaptés à leur milieu. Le climat, l'agressivité des eaux, des sols et de l'atmosphère sont donc des paramètres à prendre en compte dès la conception du béton afin que celui-ci présente au final les caractéristiques physico-chimiques adaptées à l'environnement dans lequel il s'insérera. Pour évaluer expérimentalement la durabilité du béton, il faut étudier son comportement vis-à-vis d'un certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader. Pratiquement, la durabilité dépend du choix des matériaux, de la composition du béton, ainsi que du

degré de suivi pendant la mise en œuvre, la cure du béton. Le choix des indicateurs de durabilité et des critères de performance des bétons permet de déterminer des objectifs de durabilité compatibles avec le milieu environnant et avec la durée de service considérée. Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP. Selon les données de la littérature concernant la microstructure des bétons autoplaçants, les phénomènes qui nuisent à la durabilité du béton sont la perméabilité (aux gaz), la migration des ions de chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et la résistance au gel – dégel [181].

2.6.1 Perméabilité à l'eau

En général, la perméabilité à l'eau est liée à la porosité du béton, plus les pores sont larges plus la perméabilité est élevée. Donc la pénétration des substances nocives dans un mélange dépend de sa perméabilité. Cela est traduit par la loi de Darcy [182]. La perméabilité est influencée par le rapport E/C. Si ce dernier est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores capillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible. Tsivillis et al. [183] ont montré que l'addition de filler calcaire a un effet positif sur la perméabilité du béton. Une étude récente [262] a examiné l'effet des fines calcaires (LF) sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression pour des mélanges de BAP à 180 jours (Figure 2.17).

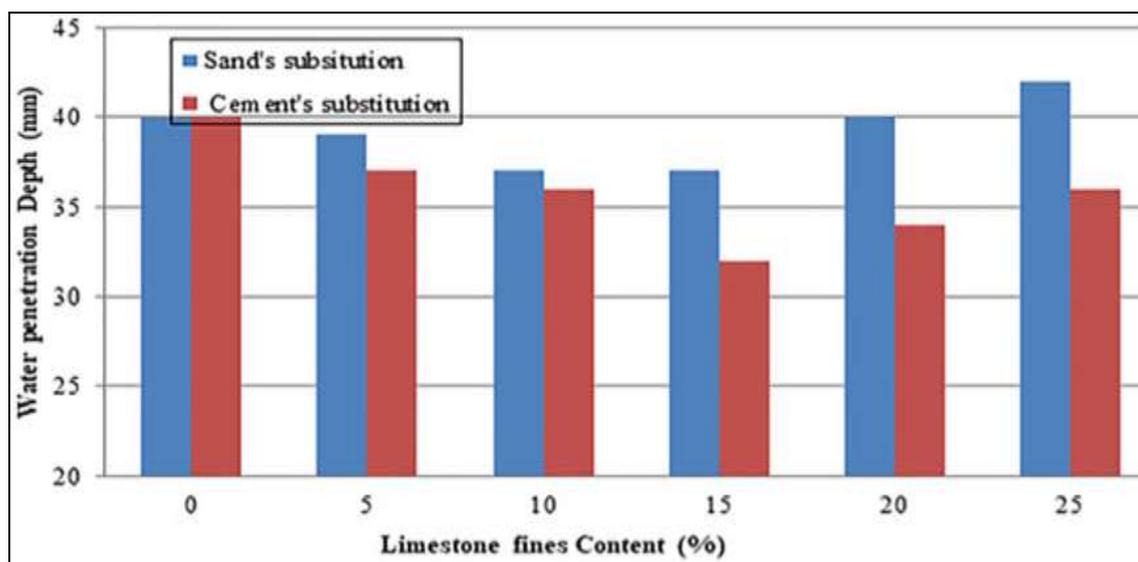


Figure 2.17: Perméabilité à l'eau en fonction du taux de fines calcaires [262].

Les résultats trouvés montrent une relation inversement proportionnelle entre la profondeur de pénétration d'eau et le pourcentage de (LF) dans tous les mélanges

jusqu'à 15 %. Pour les échantillons dont le taux est supérieur à 15 %, la pénétration de l'eau devient plus profonde, et de plus, les profondeurs de pénétration de l'eau sont de l'ordre de 32 à 42 mm pour les deux types de remplacement partiel.

2.6.2 Absorption d'eau

Les chercheurs [262] ont trouvé que l'augmentation du taux de remplacement du sable et du ciment par les fines calcaires dans les mélanges de BAP, conduit à une légère augmentation du coefficient de sorptivité (Figure 2.18).

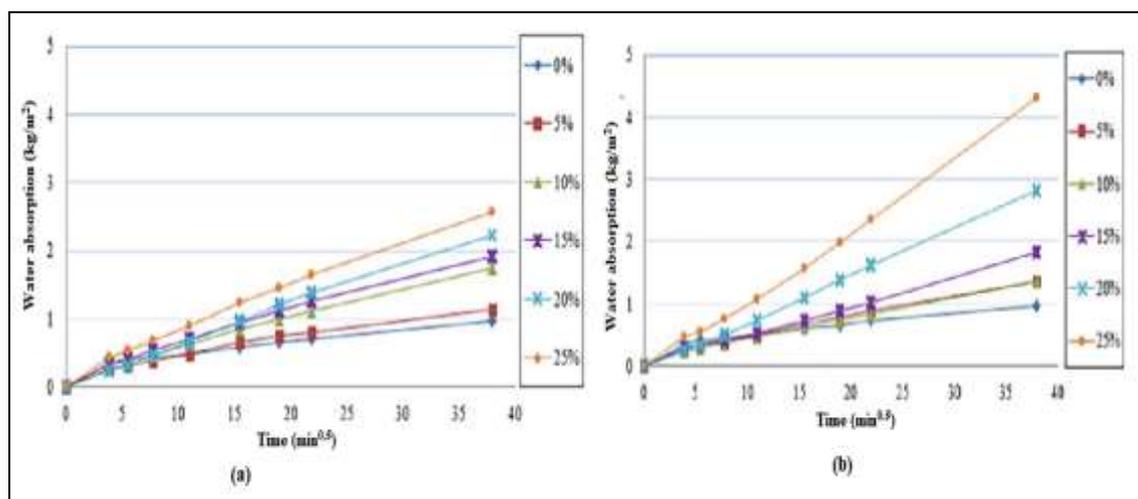


Figure 2.18: Effet de la teneur des fines sur l'absorption d'eau pour les mélanges de BAP :remplacement du SC par LF, b) rempacement du ciment par LF [262].

Le coefficient de sorptivité varie entre 20×10^{-3} et 101×10^{-3} ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), et le mélange avec 25% de LF en remplacement de ciment présente la valeur la plus élevée de sorptivité obtenue. Par conséquent, selon ces résultats, l'ajout de LF jusqu'à 15 % comme remplacement de sable ou de ciment a des effets négligeables sur l'absorption d'eau du différents mélange de BAP.

Selon Boel [184] l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est similaire à celle des bétons ordinaires. Les deux paramètres cités précédemment augmentent avec l'augmentation du rapport E/C et la porosité du BAP. L'utilisation des fillers calcaires dans la confection des BAP a présenté un effet positif et négatif pour l'absorption par capillarité et par immersion respectivement.

En général, l'absorptivité est influencée par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est important, plus la quantité mesurée d'absorptivité est faible. La composition particulière des BAP (volume de pâte plus élevé, additions minérales)

pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés. Cependant, d'autres essais réalisés par Zhu W et al. [185] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés et est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes (Figure 2.19).

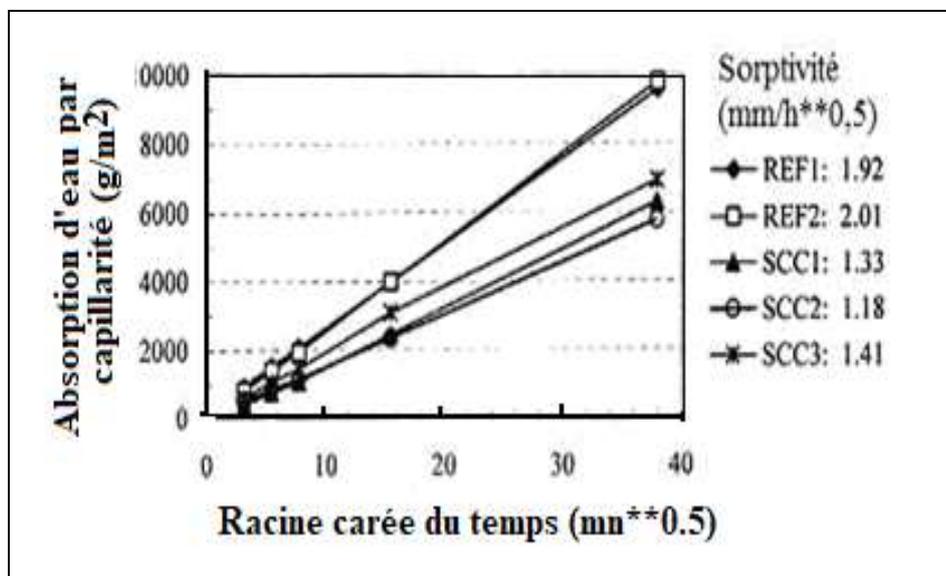


Figure 2.19: Comparaison entre l'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés selon [185].

De Shutter G, et al. [186] considèrent que l'absorption d'eau par immersion n'est pas un paramètre fiable pour l'estimation de la résistance contre la carbonatation et la migration de chlorures. L'absorption d'eau par immersion peut donner une idée générale sur la porosité totale du béton, mais elle n'est pas fortement liée avec la perméabilité. D'autres études [148] montrent que les propriétés d'absorption d'eau du béton diminuent avec l'évolution du dosage en laitier indépendamment des conditions de cure et de l'âge. Cependant, les BAP avec dosage élevé en cendres volantes présentent une grande absorption d'eau [187].

2.6.3 Perméabilité aux gaz

La perméabilité au gaz dépend de la teneur d'eau interstitielle, du rapport E/C et de la pression appliquée au cours de l'essai [188]. Tragardh et al. [189] ont montré que les fillers calcaires offrent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés avec un même rapport E/C. De plus, la porosité de ces BAP se trouve plus faible que celle des bétons vibrés. Certains résultats [185,190] ont montré que la perméabilité des

BAP à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés (Figure 2.20). Les mélanges étudiés ont des propriétés très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il résulte de ces constats que la diminution de la perméabilité est particulièrement due à l'emploi d'additions minérales dans les BAP.

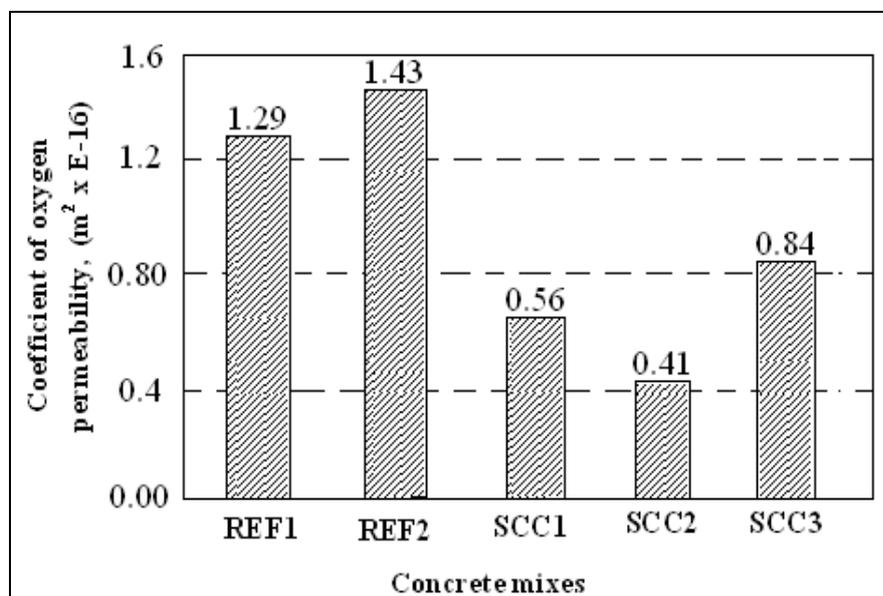


Figure 2.20: Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants [185].

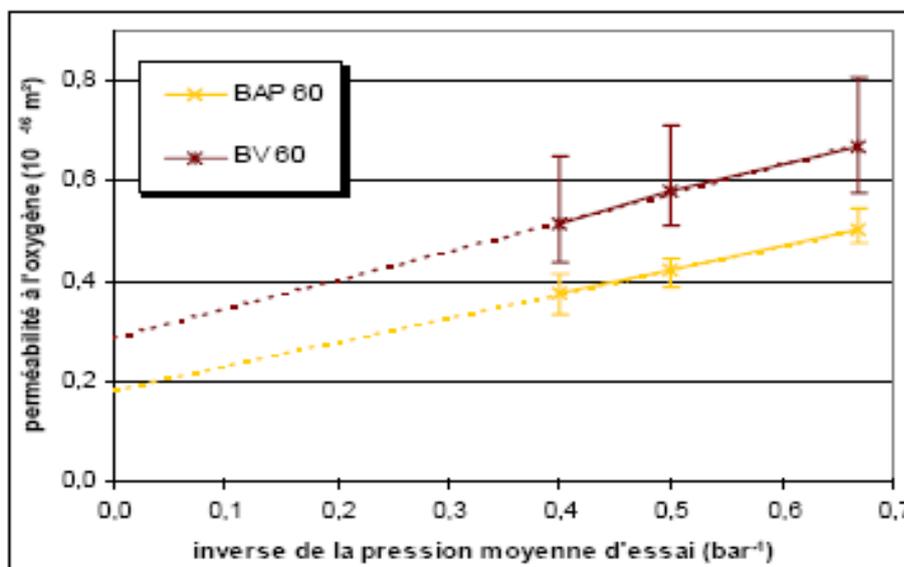


Figure 2.21: Comparaison de la perméabilité au gaz entre un BAP et BV [134].

Assié [134] a montré que les mélanges de BAP sont plus résistants à la pénétration d'un gaz tel que l'oxygène que les mélanges de béton vibré correspondants, de ce fait, la

perméabilité au gaz pour un BAP60 est plus faible que celle d'un béton vibré BV60 comme l'indique la figure 2.21. L'effet de fines calcaires (LF) comme remplacement partiel du sable de concassage (CS) et du ciment sur la perméabilité aux gaz pour des mélanges de BAP à l'âge de 180 jours a été examiné [262] (Figure 2.22).

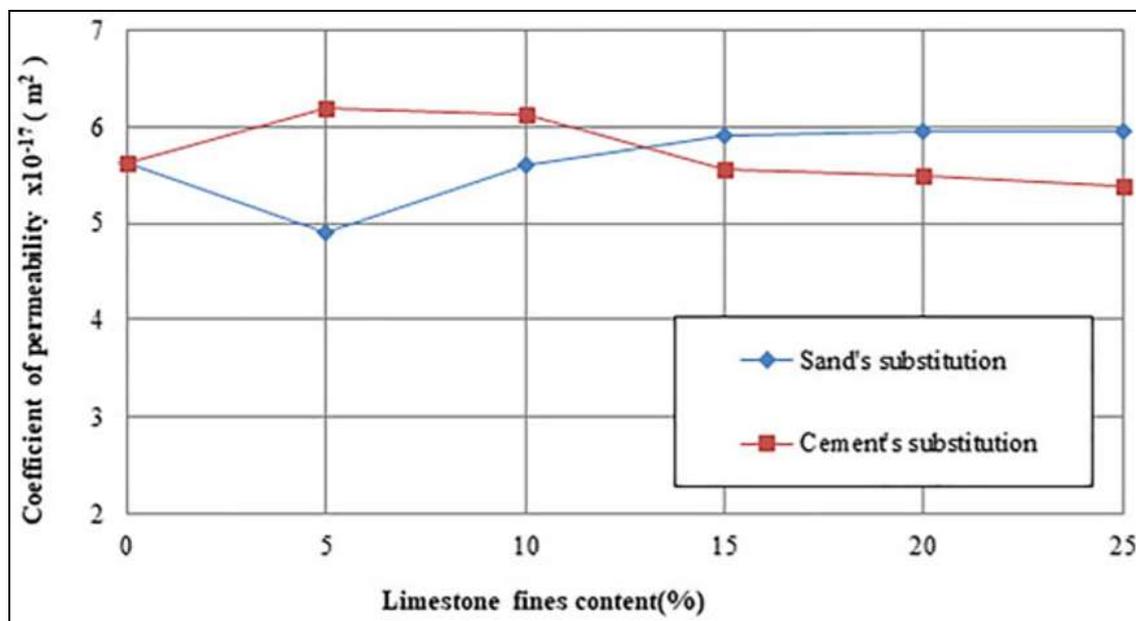


Figure 2.22: Perméabilité aux gaz des BAP en fonction du Taux de fines calcaires [262].

Les résultats obtenus montrent que les valeurs du coefficient de perméabilité aux gaz sont de l'ordre de $4,91 \times 10^{-17}$ à $6,19 \times 10^{-17}$ m² pour les deux séries de mélanges BAP. Pour les premiers échantillons de substitution de sable, ce coefficient a diminué jusqu'à atteindre une valeur minimale de $4,91 \times 10^{-17}$ m² à 5 % du remplacement de LF, ce qui représente une réduction de la perméabilité au gaz de 12,7 %; Par la suite, une légère augmentation jusqu'à $5,95 \times 10^{-17}$ m² a été remarquée pour un échantillon contenant 25% de LF.

2.6.4 Diffusions des ions de chlorure

Les ions de chlorure peuvent provenir de plusieurs sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Quand ces derniers se retrouvent en teneur suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton, ils produisent une réduction du pH. Au niveau des armatures en acier, cette diminution du pH détruit progressivement la

couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors débiter. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même) [191].

La pénétration des ions de chlorure dans les matériaux cimentaires est décrite par un paramètre fondamental qui est le coefficient de diffusion. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour comprendre le phénomène de transport des chlorures, mesurer le coefficient de diffusion et prédire la durabilité potentielle d'un ouvrage.

Bonavetti et al. [192] ont examiné l'influence de la cure initiale sur la pénétration des ions de chlorure dans des mortiers à base de fillers calcaires. Cette étude a montré que la migration des ions de chlorure dans le béton au calcaire, dans le cas d'une cure humide, augmente avec l'augmentation du pourcentage du filler calcaire (0,10 et 20%). (Figure 2.23). Cependant, pour les bétons sans cure initiale, la profondeur de pénétration des ions de chlorure est supérieure de 7 à 30 mm par rapport au béton avec cure, par ailleurs, pour les bétons sans ajout, elle est de 10 à 15 mm et de 17 à 20 mm pour 10% et 20% de fines respectivement. Donc, selon cette, étude le mode de cure joue un rôle important dans le phénomène de migration des ions de chlorure dans le béton.

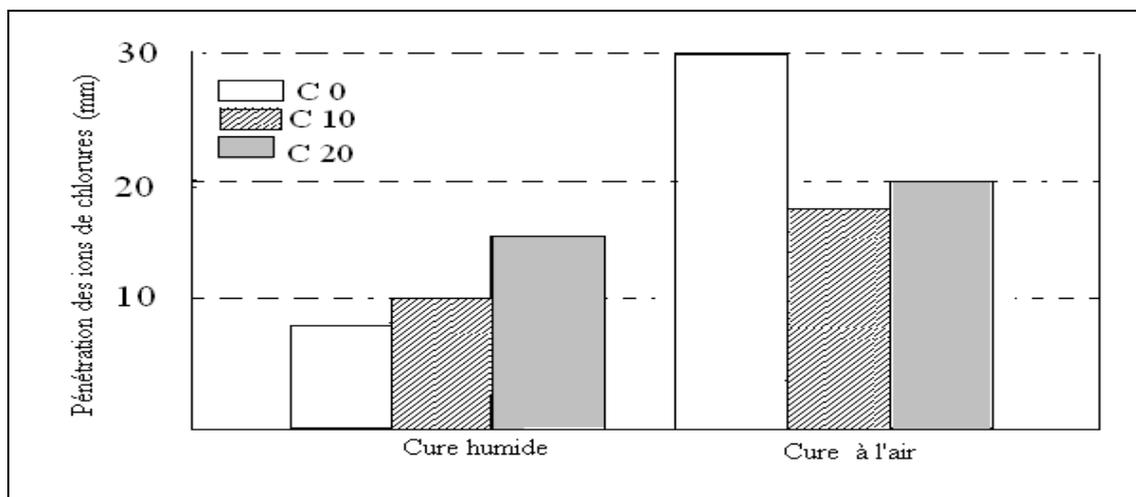


Figure 2.23: Pénétration des ions de chlorure des bétons avec cure humide et à l'air [192].

Selon les travaux de Hornain [193], l'incorporation des fillers calcaires dans la matrice cimentaire contribue à la diminution du coefficient de diffusion des ions de chlorure. D'autres études [194] ont déterminé le coefficient de diffusion des ions de chlorure

pour une série de mortier, contenant différents taux de fines calcaires broyées, à une finesse de 450 m²/kg. Les résultats trouvés ont montré que les coefficients de diffusion pour les mortiers de référence et les mortiers avec 10% de calcaire étaient comparables de l'ordre de (51.2 x 10⁻⁹ cm²/s et 53.1 x 10⁻⁹ cm²/s, respectivement), et inférieurs (14.3 x 10⁻⁹ cm²/s) pour les mortiers de calcaire avec 5% de calcaire.

Tang et al. [195] ont étudié le comportement des bétons autoplaçants et des bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions de chlorure sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions de chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10⁻¹² m²/s au lieu de 15 à 18.10⁻¹² m²/s).

D'après ces auteurs, les faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise répartition de l'addition calcaire. En outre, une étude menée par [262] dont le but d'étudier l'effet des fines calcaires issues de sable de concassage sur la pénétration des ions de chlorures pour différents mélanges de BAP à l'âge de 180 jours. Un remplacement partiel du sable de concassage et du ciment par les fines calcaire a été effectué. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du taux de remplacement partiel du sable de concassage par les fines calcaires diminuer la diffusion des ions de chlorures dans le BAP, par contre la substitution du ciment par les fines contribuer à l'augmentation de la pénétration des ions de chlorures (Figure 2.24).

Certaines études [196] trouvent que les BAP ont des coefficients de diffusion des ions de chlore équivalents ou meilleurs par rapport aux bétons vibrés. Zhu et al. [188] ont examiné l'effet du type d'addition sur la résistance à la pénétration des ions de chlorure dans le béton. Les résultats récoltés montrent que les bétons préparés avec (SCC1) ou sans filler calcaire (SCC3) et le béton vibré (REF1) donnent des coefficients de migration des ions de chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire (Figure 2.25). Ces chercheurs observent aussi que l'utilisation de cendres volantes réduit considérablement le coefficient de migration de ces bétons. Cependant, nombre d'études estiment que les résultats les plus courants indiquent des comportements équivalents des BAP et des bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion [158, 197-199]. Ces meilleures performances sont, là encore,

expliquées par la densification du réseau poreux du BAP, en raison de la présence d'une quantité importante de filler.

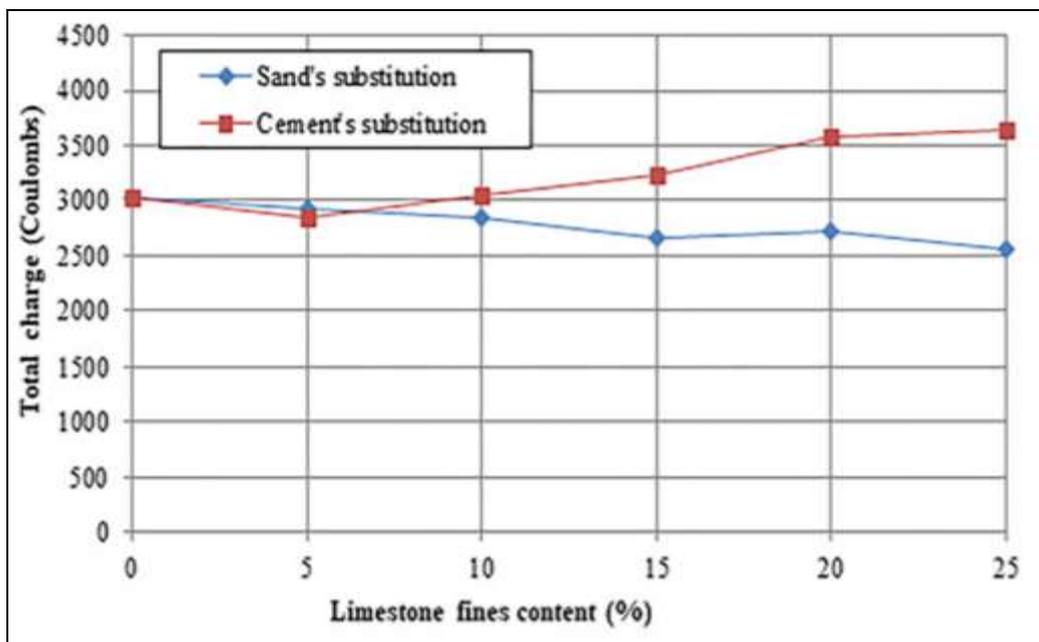


Figure 2.24: Pénétration des ions de chlorures en fonction du taux de fines calcaires [262].

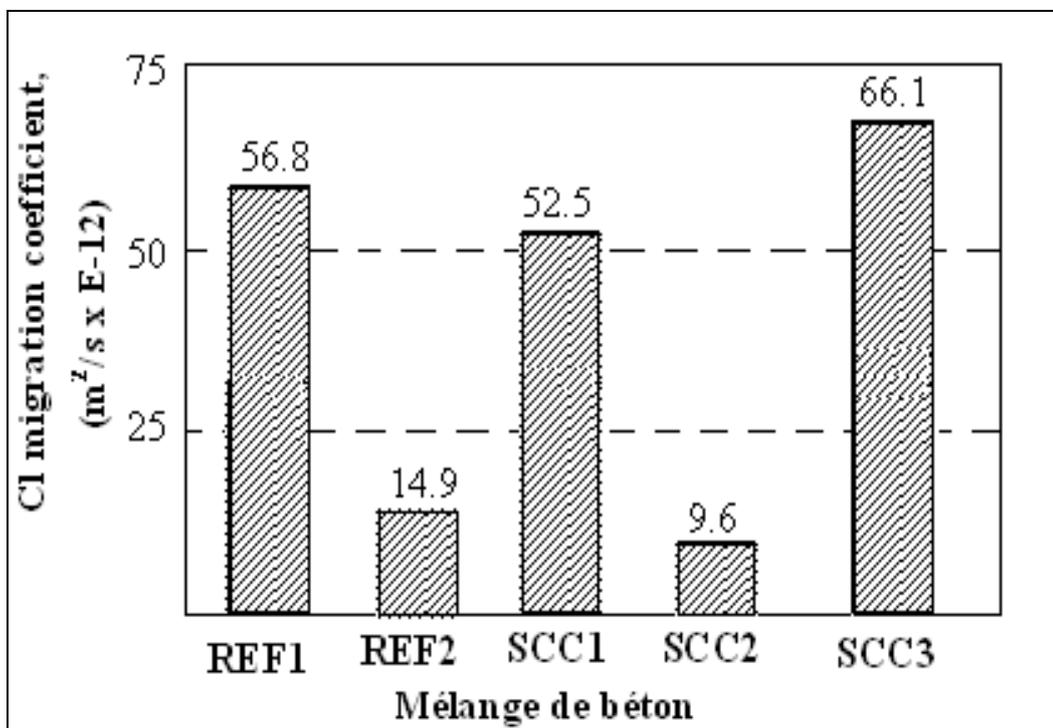


Figure 2.25: Coefficient de migration des ions de chlore de trois BAP (SCC) et de deux bétons vibrés correspondants [188].

2.6.5 Carbonatation

La carbonatation, dans des conditions d'exposition naturelle, est considérée comme un phénomène lent. Elle résulte de l'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur le béton et affecte la durabilité des structures en béton car elle peut entraîner la corrosion des armatures. En général, et sous formes de tâches de rouille sur le parement ou d'éclatement du béton d'enrobage, les premiers signes apparaissent au bout de plusieurs dizaines d'années. La teneur en CO₂ de l'air ambiant varie entre 0,03 % et 1 % c'est dans ces conditions que se produit la carbonatation naturelle. Les essais de carbonatation accélérés utilisent des mélanges gazeux nettement plus riches en CO₂. La teneur la plus faible relevée pour ce type d'essais est de 3 % [200]. Le CO₂ dissout dans la solution interstitielle du béton peut réagir avec les éléments d'hydratation du clinker que sont la portlandite Ca(OH)₂ et les silicates de calcium hydratés, afin de construire le carbonate de calcium CaCO₃. La dégradation proviendrait essentiellement de la réaction avec la portlandite selon l'équation bilan suivante [201],[202] :



Une étude comparative des BAP et bétons vibrés [203] indique qu'il semble ne pas y avoir de différence notable entre leurs cinétiques de carbonatation (Figure 2.26).

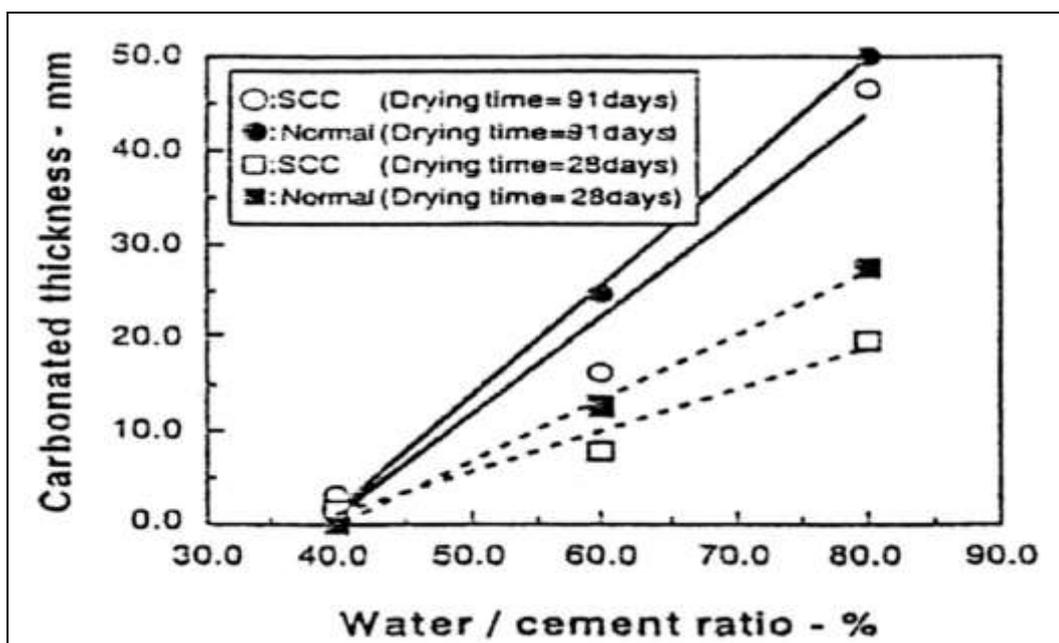


Figure 2.26: Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [203].

D'autres recherches sur la comparaison entre des BAP à base de filler calcaire et des bétons vibrés ont été réalisées [134] [204] [205]. Les résultats de ces travaux montrent qu'en général les BAP composés à partir d'un ajout de filler calcaire donnent une légère vulnérabilité par rapport aux bétons ordinaires, cependant, l'écart entre les valeurs de profondeurs de carbonatation de ces deux types de béton n'est pas important. (Figure 2.27).

Baron, J et al. [206] ont montré que les mortiers contenant des ajouts calcaires ne donnent aucun signe de carbonatation.

Pour bien détailler cette investigation, Tsvilis et al. [183] ont formulé des mortiers avec différents taux de fillers calcaires (0, 5, 10,15, 20, et 35%) et un rapport E/C fixe. Les résultats observés montrent que la profondeur de carbonatation des mortiers au calcaire est nulle pendant la durée d'exposition de 9 et 12 mois dans une solution de 3% de NaCl. Cependant, les mortiers sans ajout calcaire ont une profondeur de carbonatation de 3 à 5 mm. Ils ont observé aussi que le ciment Portland contenant 20% de fines calcaires améliore la résistance à la corrosion (Figure 2.28).

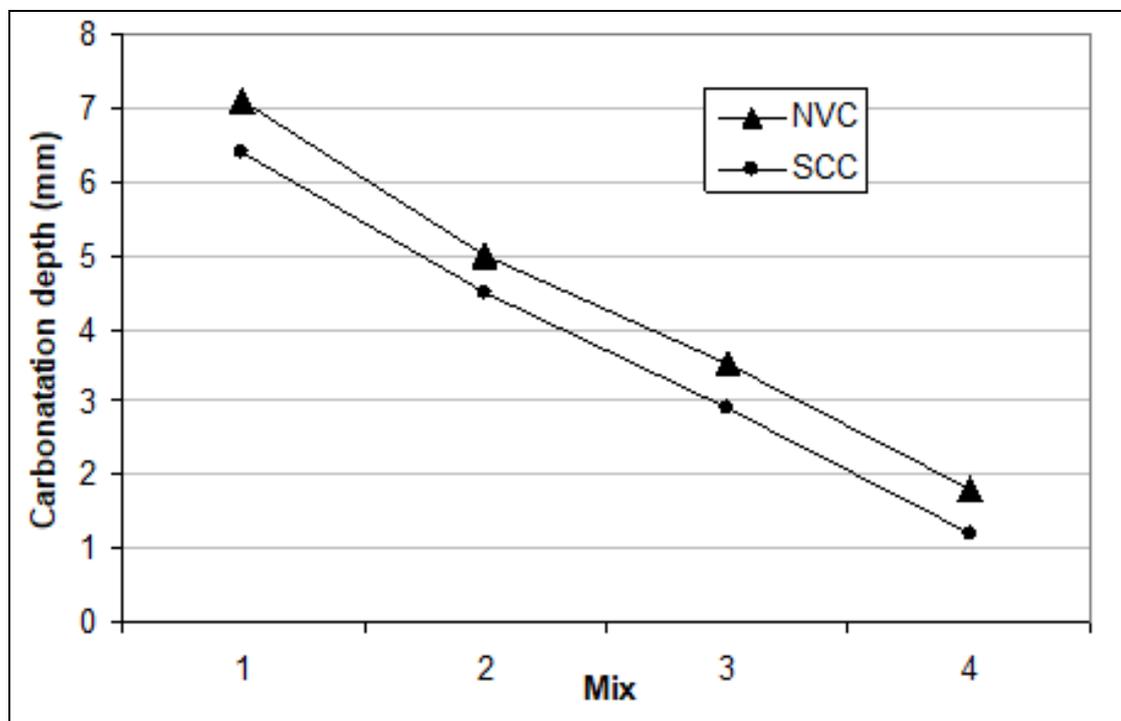


Figure 2.27: Profondeur de carbonatation d'un BAP et d'un BV après 9 mois [205].

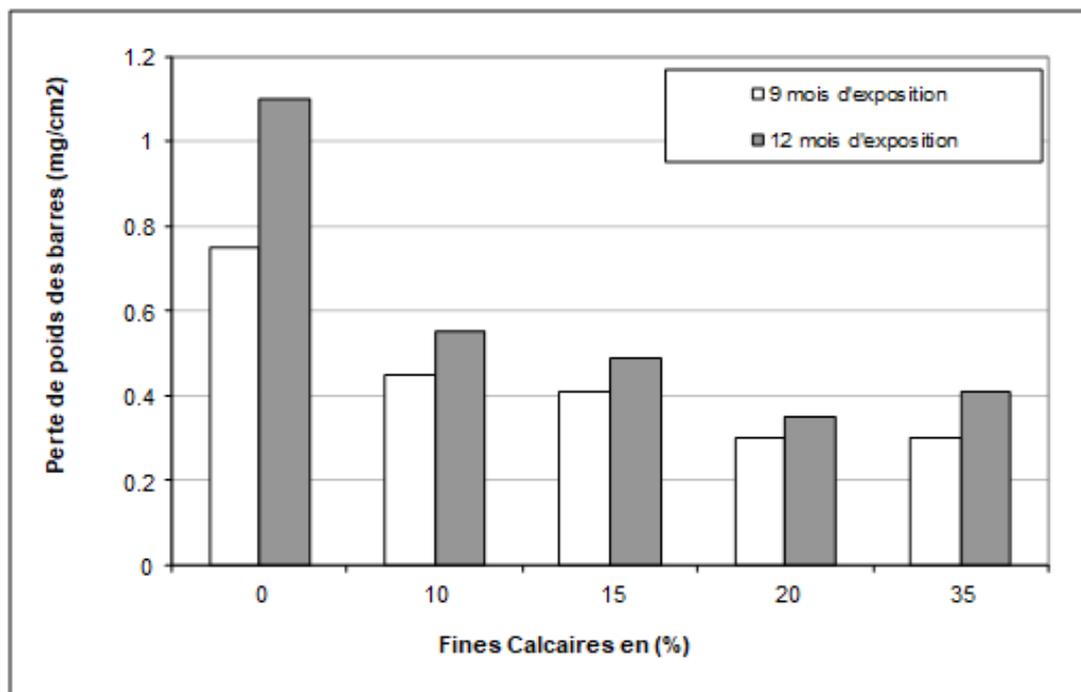


Figure 2.28: L'influence du taux de calcaire sur la corrosion [183].

Audenaert et al. [207] ont constaté que l'augmentation de la quantité de ciment, qui implique un rapport E/C plus faible, conduit à la réduction du taux de carbonatation. L'addition de filler n'a pas une influence claire sur la profondeur de carbonatation. Selon Rougeau [196] la profondeur de carbonatation des BAP est légèrement supérieure à celle des bétons vibrés. Néanmoins, les résultats indiquent que la porosité plus importante des BAP n'affecte pas largement leur résistance à la carbonatation. Les résultats de carbonatation accélérée prouvent que plus la résistance des bétons augmente plus la profondeur de carbonatation diminue. Cette grandeur est donc liée à la compacité du béton.

2.6.6 Résistance au gel-dégel

Le phénomène de gel et dégel du béton dépend, surtout, des caractéristiques et du taux de saturation de son réseau poreux, ainsi que de leurs différentes propriétés (résistance à la traction, fluage, déformabilité). Si le béton possède de l'air entraîné avec une teneur et une répartition convenable, l'expulsion de l'eau excédentaire par la glace, lors du gel, pourra se faire par l'intermédiaire de ces vides et produira moins de dégâts [208]. La quantité d'air entraîné et la répartition des bulles d'air sont donc couramment admises comme facteurs primordiaux de la résistance au gel-dégel des bétons. Pour des bétons

susceptibles de subir de telles conditions extérieures, il est recommandé d'utiliser un agent entraîneur d'air. Les recherches traitant la résistance au gel des bétons autoplaçants sont plus particulièrement des études comparatives entre ces bétons et les bétons ordinaires.

Persson, B [209] a examiné la tenue au gel d'un BAP et d'un béton vibré ayant le même rapport $E/C=0.39$ et la même teneur en air 6%. Les résultats montrent que la résistance à la fissuration interne due à l'action du gel /dégel des BAP est supérieure à celle des bétons ordinaires. D'autres chercheurs [210] ont étudié la sensibilité au gel de quatre bétons autoplaçants : Un BAP de résistance minimale de 25MPa et sans entraîneur d'air, un BAP de 25MPa avec 4% d'air entraîné ; un BAP avec 60 et 80MPa sans air entraîné. Les résultats trouvés montrent que l'ajout d'un entraîneur d'air dans un BAP n'influe pas sur la distribution poreuse, cependant il contribue à l'augmentation de la teneur de l'air occlus et au développement de la résistance au gel. Dans tous les cas, l'augmentation de la résistance à la compression améliore la résistance des BAP au gel/dégel [211]. Une étude comparative [196], entre la durabilité des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires de hautes performances, montre que les BAP sont plus résistants au cycle de gel par rapport aux bétons vibrés (Figure 2.29).

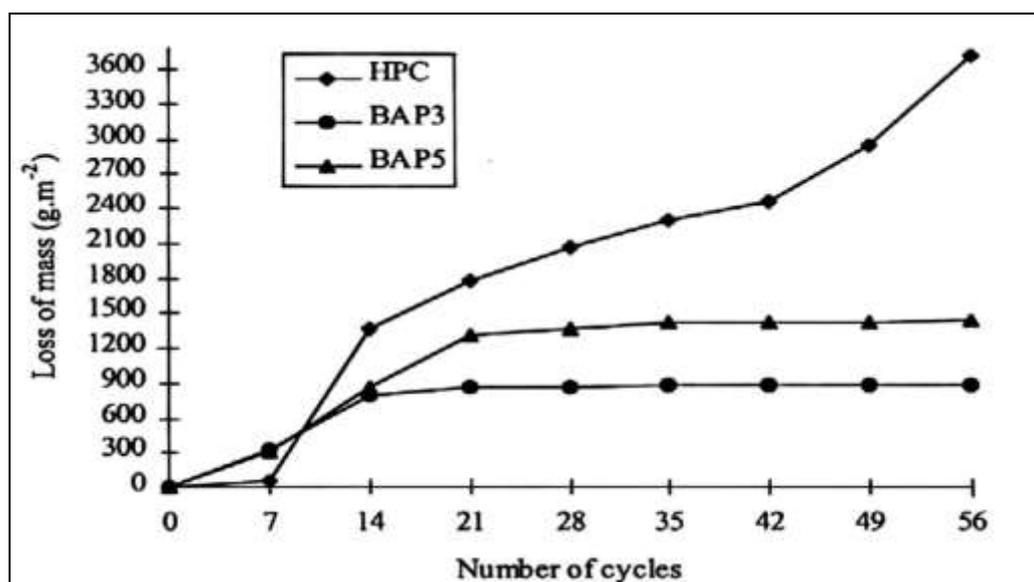


Figure 2.29: L'influence du taux de calcaire sur la corrosion [196].

2.6.7 Résistance aux sulfates

Les ions de sulfate se trouvent, en général, dans certains sols et eaux souterraines. Deux types d'attaques sont distingués, l'attaque sulfatique interne [212, 213] qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton, et l'attaque sulfatique externe qui se produit quand les ions de sulfate proviennent de l'environnement, ce type de dégradation est considéré comme une action environnementale [214].

Nehdi et al. [215] ont examiné le gonflement d'éprouvettes de différentes formulations des BAP composés avec de la cendre volante, une addition binaire (cendre volante + laitier de haut fourneau) et une addition ternaire (cendres volantes + laitier de haut fourneau + fumée de silice). Les résultats obtenus montrent qu'après 9 mois d'immersion dans la solution de 5% Na₂SO₄, le BAP sans addition minérale présente la plus forte expansion (Figure 2.30).

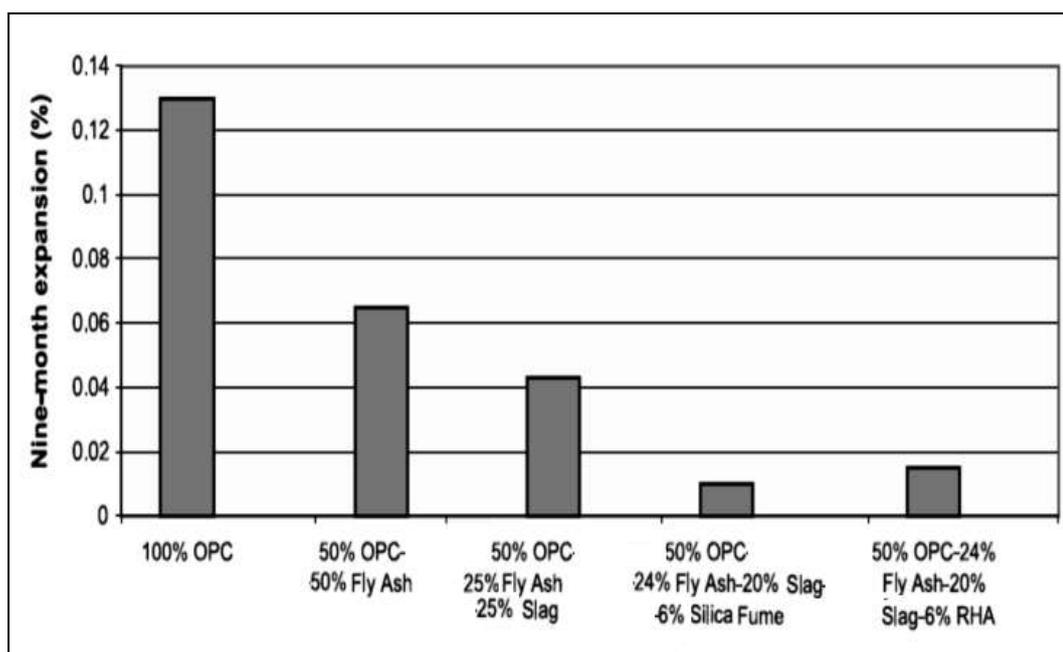


Figure 2.30: Expansion des éprouvettes de mortier de BAP équivalent après 9 mois d'immersion dans la solution 5% Na₂SO₄ [215].

D'autres chercheurs [216] ont employé des additions binaires, ternaires et aussi le filler calcaire dans les différentes compositions de BAP. Les résultats du gonflement et de la perte en masse des échantillons de BAP sont présentés dans le tableau 2.1 selon trois méthodes, à savoir l'immersion totale, l'immersion-séchage et l'immersion partielle

dans la solution de sulfate de sodium. Selon ce tableau, il est remarqué que le gonflement est très faible pour l'essai avec une immersion totale.

Cependant le BAP formulé sans additions (A1-N-50) et avec un faible taux d'additions de fumée de silice (A2-N-50) donne une expansion deux fois plus importante que celle des BAP formulés avec une addition ternaire qui contient le filler calcaire (A4-N-50 et A5-N-50).

Pour la méthode de dégradation par cycles d'immersion-séchage, l'effet négatif du filler calcaire est distingué par des gonflements dix fois plus grands que ceux des BAP sans filler calcaire. Pour l'attaque sulfatique, une faible perte en masse a été remarquée pour les BAP formulés avec du filler calcaire. L'essai par immersion partielle montre une grande dégradation des deux BAP composés d'ajouts de filler calcaire.

Tableau 2.1 : Expansion et perte de masse de BAP après 24 mois d'immersion dans la solution Na₂SO₄, l'eau de mer et l'eau distillée [216].

| Mélange | Immersion I | | Immersion II | | Immersion III | |
|-------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| | Expansion (%) | Perte de masse (%) | Expansion (%) | Perte de masse (%) | Expansion (%) | Perte de masse (%) |
| SRPC | 0.02 | 0.62 | 0.04 | 0.80 | - | 0.96 |
| A1-N50 | 0.06 | 0.91 | 0.07 | 1.18 | - | -3.04 |
| A2-N50 | 0.03 | 0.82 | 0.04 | 0.23 | - | -0.53 |
| A3-N50 | 0.02 | 0.55 | 0.03 | 0.61 | - | -1.03 |
| A4-N50 | 0.04 | 0.37 | 0.35 | -2.85 | - | -18.34 |
| A5-N50 | 0.01 | 0.37 | 0.47 | -1.10 | - | -28.90 |
| SRPC | 0.02 | 0.62 | 0.04 | 0.80 | - | 0.96 |

La figure 2.31 présente une étude [217], comparant des BAP à base de différents pourcentages de filler calcaire et des BOV. Il est remarqué que l'augmentation de la masse des échantillons immergés dans la solution de sulfate de sodium, dans l'eau de mer et dans l'eau distillée est indépendante de la quantité de filler calcaire présente dans le BAP.

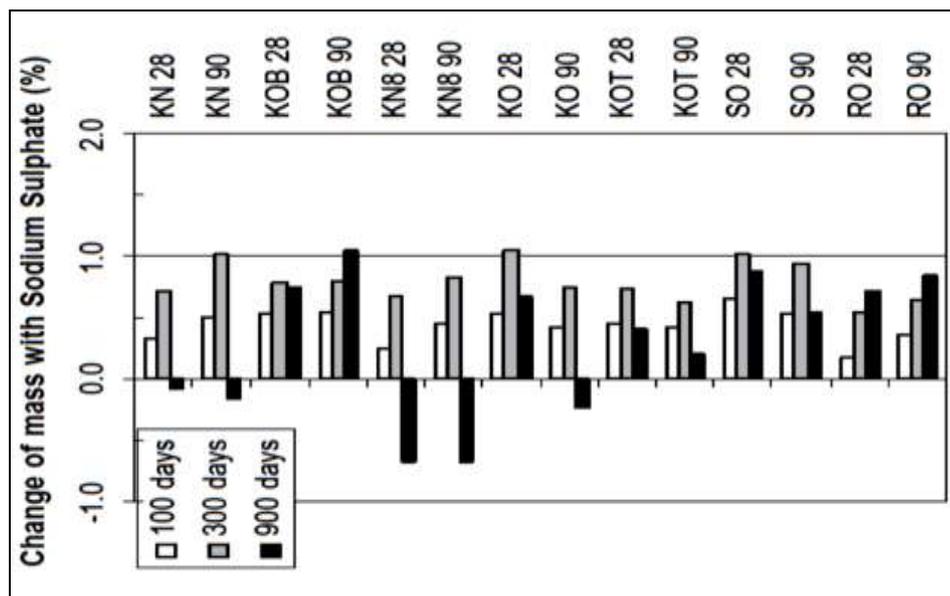


Figure 2.31: Variation de la masse après immersion dans la solution de 18 g/l de sulfate de sodium (Na_2SO_4) [217].

2.7 Conclusion

A travers cette synthèse, nous avons remarqué que les travaux concernant l'effet du sable de concassage sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP sont peu nombreux. A cet effet, cette recherche va éclaircir l'effet des fine calcaires substituant le sable de concassage sur le comportement des BAP.

Les études menées sur la durabilité des bétons autoplaçants montrent qu'il existe une relation entre la composition du BAP et les propriétés de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) et la résistance chimique (carbonatation, attaque sulfatique) de ces matériaux cimentaires.

CHAPITRE 3

MATÉRIAUX ET ESSAIS

3.1 Introduction

Dans cette partie, on va présenter les différents matériaux principaux utilisés et les essais effectués. On commencera par la caractérisation des matériaux utilisés dans la confection des bétons autoplaçants, ensuite on exposera la méthode de formulation adoptée pour les différents mélanges de BAP.

Enfin, on terminera par la définition des procédures des essais expérimentaux effectués pendant l'examen et l'investigation des différents échantillons de bétons à l'état frais et à l'état durci.

3.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

La qualité et la durabilité d'un BAP sont liées directement aux propriétés de ses divers constituants. La maîtrise du comportement des matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges et les proportions avec lesquelles ils entrent dans les compositions permettent une bonne interprétation des résultats trouvés.

3.2.1 Ciment

Le type de ciment utilisé dans cette étude est un ciment du type CEM I 42.5, conforme à la norme NF P 15-471 [218]. Il est caractérisé par une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa, une masse spécifique de 3,1 g/cm³ et une surface spécifique de Blaine (SSB) de 3000 cm²/g.

Les propriétés chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

| Compositions chimiques (%) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------|-------------------|-------------------|-----|-----|
| CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | PAF | RI |
| 64,0 | 22,0 | 4,6 | 4,9 | 0,8 | 1,1 | 0,12 | 0,4 | 1,4 | 0,4 |
| Compositions minéralogiques (%) | | | | | | | | | |
| C ₃ S | | C ₂ S | | | C ₃ A | | C ₄ AF | | |
| 62,8 | | 21,3 | | | 1,8 | | 14,1 | | |

3.2.2 Granulats

3.2.2.1 Sable

Deux types de sable ont été utilisés pour la préparation de tous les mélanges de BAP. Un sable de concassage (SC) grossier de nature minéralogique calcaire provenant de la carrière d'El-Hachimia (Algérie) et un sable siliceux (SS) fin de la région d'Hassi Bahbah (Sud de l'Algérie).

Le module de finesse et l'équivalent de sable pour les sables (SC) et (SS) étaient (3.15, 70%) et (0.98, 84%) respectivement. Le module de finesse du sable corrigé est devenu égal à 2,5. Le sable de concassage a été tamisé afin d'enlever les fines inférieures à 80µm. La texture de la surface et la forme des particules de ces sables sont illustrées sur la Figure 3.1.



Figure 3.1: Texture et forme des particules des deux sables.

La densité apparente du sable (SC, SS) était de 2,54 et 2,63, respectivement et leurs absorptions étaient respectivement de 0,02 et 0,38%. La composition chimique du sable de concassage est présentée dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Composition chimique et minéralogique du sable de concassage

| Oxydes | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | Perte au feu |
|---------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|--------------|
| Sable de concassage | 4.51 | 1.09 | 0.54 | 50.68 | 1.01 | - | - | traces | 41.04 |

Une composition minéralogique déterminée par diffraction de rayons X du sable de concassage est donnée sur la figure 3.2. Il est remarqué, selon cette figure, que le sable est composé de 98% de calcite.

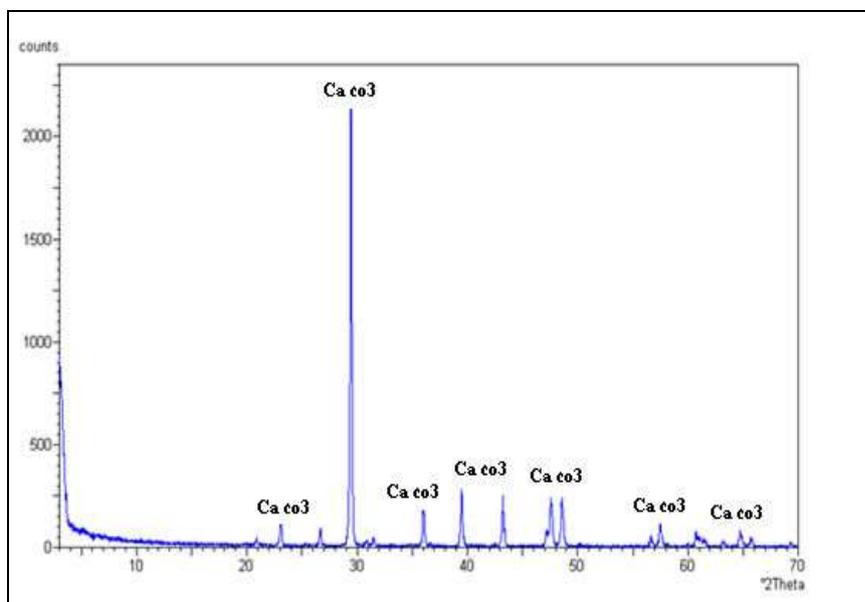


Figure 3.2 : Diffractogramme de rayons X du sable de concassage.

Les courbes granulométriques du sable siliceux, sable concassé avec et sans filler sont illustrées sur la figure 3.3.

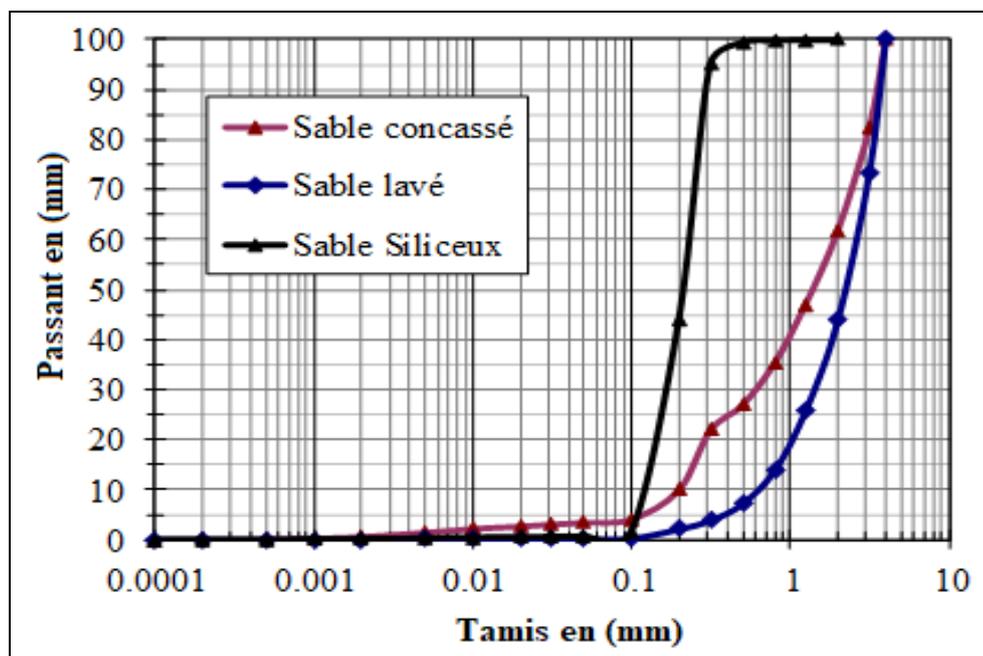


Figure 3.3: Courbes granulométriques des sables utilisés.

3.2.2.2 Fillers Calcaires

Le filler calcaire (FC) qui est issu du sable de concassage, a été utilisé comme substituant de ce dernier ; leurs compositions chimiques et caractéristiques physiques sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 3.3 : Composition chimique des fines calcaires

| Oxydes (%) | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Perte au feu | Insoluble residue |
|---------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|-------------------|------------------|--------------|-------------------|
| Sable de concassage | 54.3 | 1.78 | 0.79 | 0.34 | 0.20 | - | - | | 42.5 | - |

Les résultats de l'analyse chimique et l'analyse par DRX présentés dans la figure 2.4 montrent que le filler calcaire utilisé contient principalement de la calcite (CaCO₃). L'analyse granulo-lazer de ce filler est présentée sur la figure 3.5.

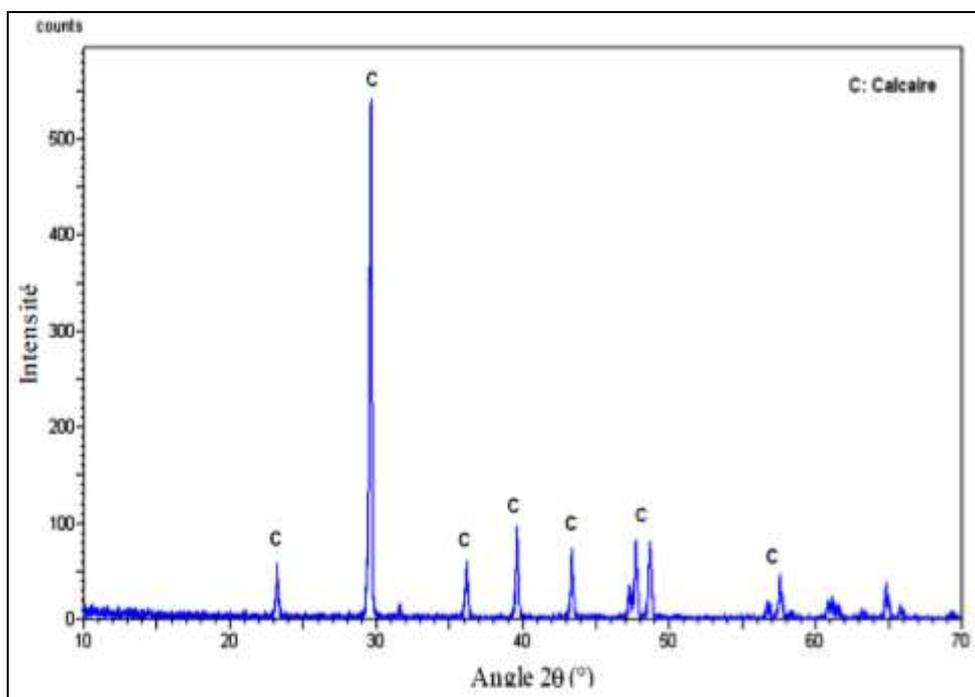


Figure 3.4 : DRX de fines calcaires.

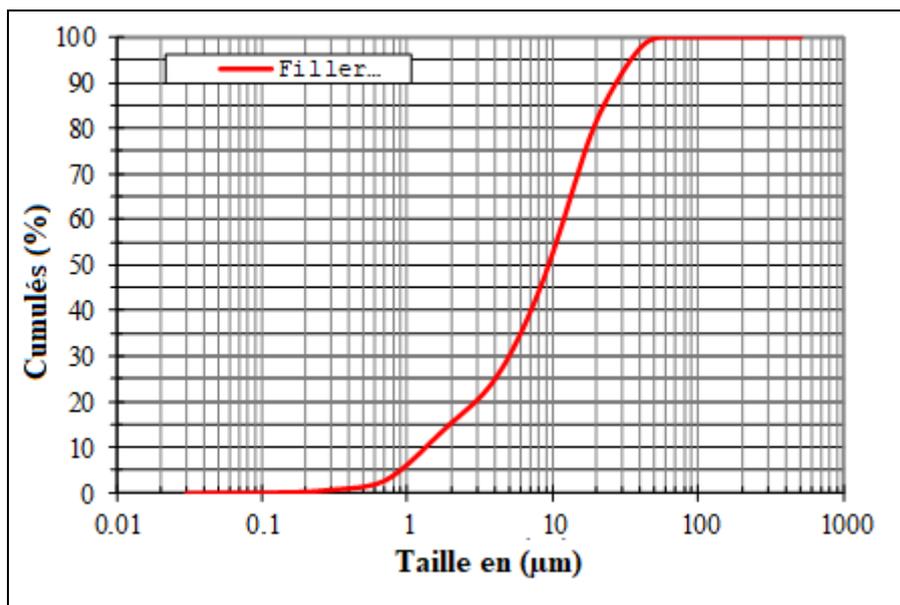


Figure 3.5 : Courbe Granulo-lazer des fines calcaires.

3.2.2.3 Graviers

Les graviers utilisés dans la confection des BAP sont de classe granulaire 3/8 et 8/15 issus de concassage des roches calcaires. Ils sont d'origine basaltique provenant de la carrière de concassage de Beni Slimane (Médéa). La densité apparente des graviers (3/8 et 8/15) était de 2,62 et 2,63, respectivement et leurs absorptions étaient respectivement de 0,20 et 0,30%. Les courbes granulométriques sont illustrées sur la figure 3.6.

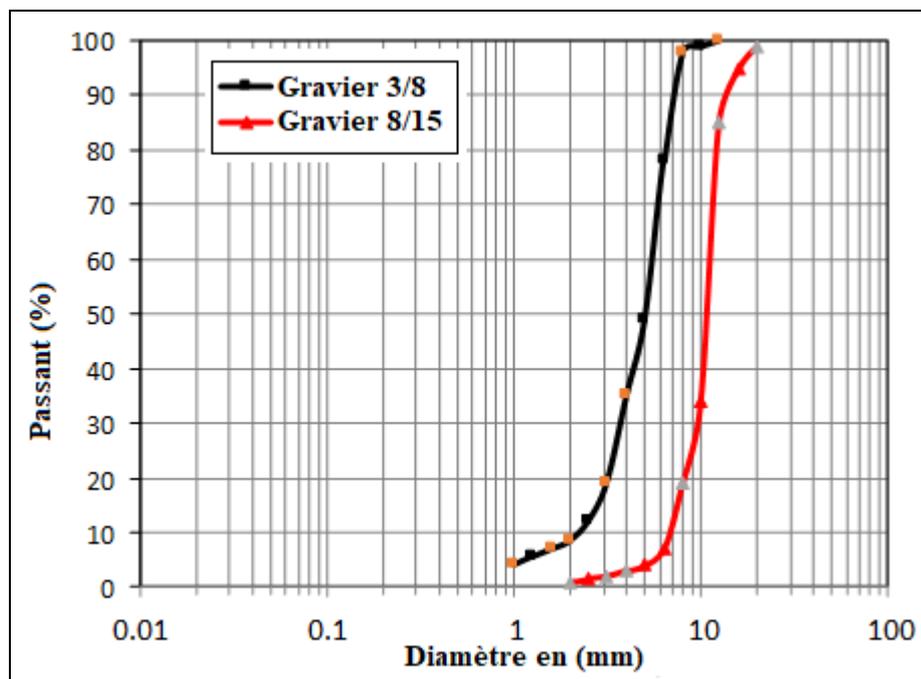


Figure 3.6 : Courbe granulométrique du gravier 8/15 et 3/8.

3.2.3 Superplastifiant

Pour tous les mélanges de BAP, un seul adjuvant de la nouvelle génération a été utilisé. Le superplastifiant MEDAFLOW 145 est un haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polycarboxylates d'éther modifiés et est caractérisé par une forme liquide de couleur brun clair et un PH variant entre 5 et 6. La densité et l'extrait sec de ce superplastifiant sont respectivement 1.065 et 30 %. Le MEDAFLOW 145 contribue à la diminution du rapport E/C, tout en améliorant considérablement la fluidité du béton ; sa plage de dosage recommandée est de 0.3 à 2 %. Il possède une teneur en ions de chlore inférieure à 0,1% et il permet, aussi, d'augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme.

3.2.4 L'eau de gâchage

Dans cette étude, l'eau utilisée pour les mélanges des mortiers et des bétons autoplaçants est une eau de robinet, potable, exempte d'impuretés et maintenue à une température constante.

3.3 Formulation des BAP

La formulation a pour but de déterminer les proportions nécessaires de chaque composant de la gâchée, et ce, pour obtenir un béton de bonnes propriétés souhaitées. Le rapport Eau/Liant est considéré comme le paramètre le plus influant dans cette opération de formulation.

La caractérisation d'un béton autoplaçant pendant sa formulation consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir des essais mis en place. Obtenir un BAP nécessite une bonne manipulation de certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

Bouhamou et al. [138] ont remarqué que la formulation du BAP dépend du choix de ses constituants et de l'optimisation des paramètres dominants en particulier les rapports : eau/ciment (E/C), addition/Ciment (F/C), dosage en superplastifiant, volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons.

La caractérisation d'un BAP est basée sur des tests empiriques dont le but est de vérifier ses propriétés à l'état frais. Dans cette étude, nous mettons l'accent sur l'examen de

l'effet des fines calcaires en tant que substituant partiel du sable de concassage sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplaçants.

3.3.1 Formulation des mortiers autoplaçants

La phase du mortier est une étape très importante dans la formulation des BAP, car elle permet de prédire le comportement rhéologique des BAP, par la fourniture d'une lubrification entre les gros granulats et la stabilité du béton. Deux critères sont requis pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations. En termes de rhéologie, cela revient à diminuer le seuil de cisaillement du mortier tout en gardant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue à l'aide des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'un effet limité sur la viscosité plastique, de même une quantité supplémentaire d'eau peut abaisser le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Jin et Domone [139] ont réalisé des tests sur mortier car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc, les propriétés du mortier sont dominantes.
- L'identification du comportement du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et facile que tester un béton.

D'après les recommandations de Domone et al. [96], le comportement rhéologique du mortier est semblable à celui du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'éviter la ségrégation du béton durant l'écoulement. En l'absence d'un rhéomètre pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, la fluidité du mortier peut être évaluée par l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel).

La formulation de notre mortier autoplaçant à base des matériaux locaux, notamment le sable de concassage, a été basée sur la méthode Okamura avec un ajustement au niveau de la teneur en sable, du rapport Eau/Liant (E/L) et du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L).

Le choix du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est assuré par l'essai d'étalement, le diamètre de la galette obtenu devant être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [96].

3.3.1.1 Fixation du rapport Eau/Liant (E/L)

Le rapport (E/L) est un paramètre très important dans la formulation d'un mortier autplaçant, en effet, sa fixation nous oblige à faire plusieurs essais préliminaires de mesure sur l'étalement et le temps d'écoulement.

Nous avons effectué des essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Felekoglu B et al. [219] ont estimé que le rapport E/C optimum pour constituer un BAP est compris entre 0,84 et 1,07 en volume qui coïncide à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports (E/C) en dehors de cet intervalle peuvent provoquer un blocage ou une ségrégation du mélange. Les différents essais préliminaires effectués ont montré qu'il faut adapter un rapport E/C égal à 0,40 afin d'avoir un mortier autplaçant qui répond aux critères cités précédemment. Les résultats trouvés ont permis d'adopter un rapport E/L de 0,40.

3.3.1.2 Fixation du rapport Sable/Mortier (S/M)

L'optimisation du rapport Sable/Mortier sert à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour aboutir, par la suite, à des BAP de bonnes caractéristiques à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0,4 ; 0,45 et 0,50 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L). Dans notre cas, on a opté un rapport (S/M) égal à 0.5 pour tous les essais programmés.

3.3.1.3 Fixation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Afin d'évaluer l'influence de la teneur en superplastifiant sur le mortier à l'état frais, nous avons examiné la relation du diamètre d'étalement (cône d'Abrams) et du temps d'écoulement (V-funnel) en fonction du dosage en superplastifiants Sp/L, qui varie de 1.2% à 2.2%. Les différents essais réalisés dans cette étude favorisent une quantité fixe du rapport (Sp/L) de 1.5 en masse de liant pour tous les types de mortiers envisagés.

3.3.1.4 Préparation des mortiers autoplaçants

Pour la confection du mortier, un calcul des proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) a été effectué selon l'exemple de formulation du mortier présenté selon l'annexe A.

La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit (Figure 3.7) :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité),
- Malaxer pendant une minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau),
- Malaxer pendant une minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

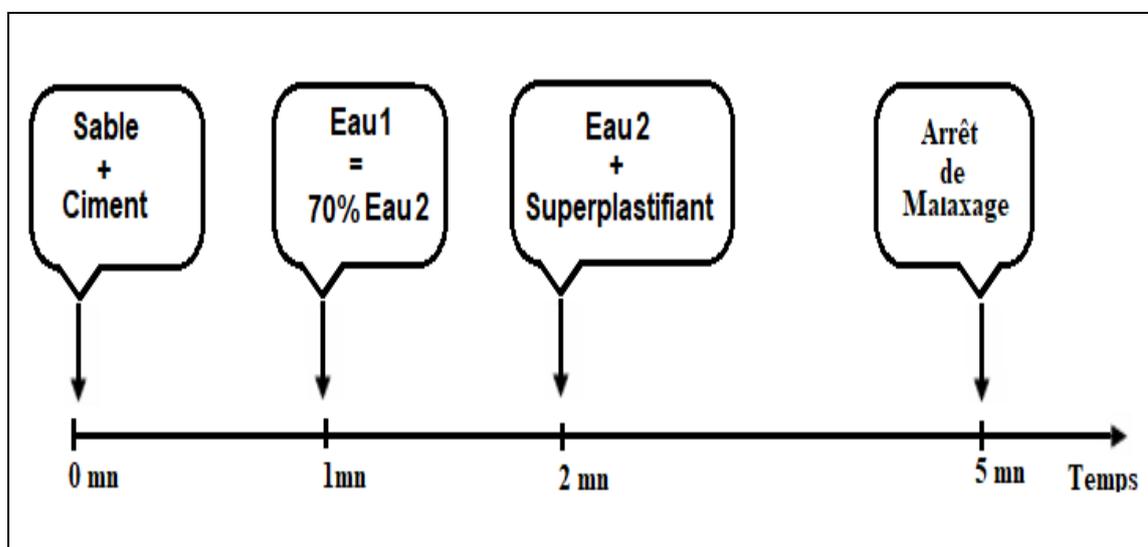


Figure 3.7: Séquence de malaxage du mortier autoplaçant [96].

3.3.2 Formulation du BAP de référence

Les différents essais effectués sur le mortier autoplaçant (MAP) ont permis en premier lieu, de fixer les rapports (E/L), (S/M) ainsi que Sp/L et par la suite, de faciliter la

formulation du BAP de référence (0% de fines calcaires). Par l'exécution de la méthode générale, on formule les différents mélanges de BAP sur la base des résultats d'optimisation de mortier. Si nécessaire, le rapport Sp/L sera corrigé afin d'aboutir un bon étalement sans ségrégation ni ressuage. A partir du moment où les rapports seront adoptés, on commencera les différents essais sur béton frais et sur béton durci. Pour la confection du béton autoplaçant, les quantités du mélange (ciment, gravier, sable, eau et superplastifiant) ont été déterminées selon l'annexe B.

3.3.3 Procédure de préparation d'un échantillon de BAP avant test

Avant de procéder à l'opération de malaxage, il est nécessaire de prendre connaissances des remarques suivantes :

- En général, pour un faible rapport eau/liant et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé [220].
- Un malaxage intensif disperse mieux les particules de poudres. En cas de mauvais malaxage, ces particules de poudres restent dans la phase pâte et rendent le béton plus visqueux [221].
- L'étalement et la résistance à la compression sont les plus influencés par le temps de malaxage [222].
- Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du béton (environ 70% de l'eau de gâchage).
- La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à l'obtention d'un béton performant et durable.

Pour notre cas, tous les mélanges de BAP ont été préparés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres, dont la séquence de malaxage est celle proposée par Domone et Jin [96] ; la figure 2.8 illustre la procédure.

- Déterminer la quantité d'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur par la formule suivante :

$$E_{\text{efficace}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{teneureau}} - E_{\text{adjuvant}} + E_{\text{absorbéepar granulates}} \quad (3.1)$$

- Calculer les proportions du ciment, du sable, du gravier 3/8, du gravier 8/15 et du superplastifiant (voir annexe B) ;
- Malaxer le sable, le ciment, les fines calcaires et le gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes.

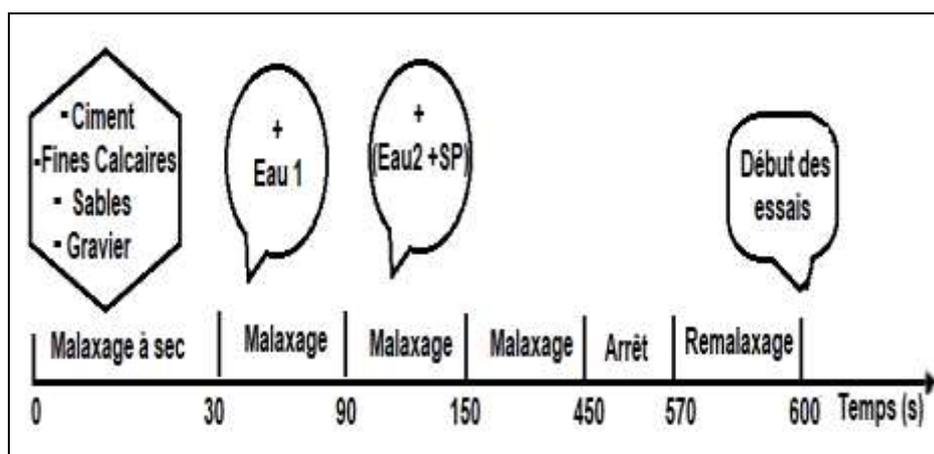


Figure 3.8: Séquence du malaxage du béton autoplaçant [96].

3.3.4 Substitution du sable de concassage par les fines calcaires

Après avoir formulé le BAP de référence (BAP0%FC), on passera à la substitution du sable de concassage (SC) par les fines calcaires à différents pourcentages. Des recherches antérieures [160] ont examiné l'influence de fines calcaires substituées au sable de concassage sur l'ouvrabilité des bétons. Deux types du béton ont été testés : un béton de faible résistance ($E/C = 0,55$) et un béton de haute résistance ($E/C = 0,32$). Les résultats trouvés ont montré que l'ouvrabilité est meilleure avec un pourcentage de fines calcaires allant de 10 à 15% et de 7 à 10%, respectivement. Cependant, ils ont remarqué

que dans les mélanges de béton avec un rapport E/C de 0,55, il se produit une ségrégation.

D'autres études [165], ont testé l'effet des fines issues du sable de concassage sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du béton. Ils ont utilisé deux types de fines de nature calcaire et de nature siliceuse avec des taux de fines de 0, 10, 15 et 20% comme substitution au sable concassé. Ils ont constaté que la demande en eau augmente avec l'augmentation des pourcentages de fines dans le béton.

Bonavetti et al. [223] ont examiné l'impact des fines substituées au sable sur les propriétés physiques et chimiques des mortiers. Trois types de fines de nature quartz, granite et calcaire ont été utilisées avec un taux de fines variant de 0 à 20%. Les résultats montrent que la demande en eau augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines dans le mortier. Selon ces études, on peut signaler que les valeurs de substitution des fines calcaires dans le sable se situent entre 0 et 20%.

Les approches de formulation d'un béton sont nombreuses, chacune fixe les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des fines calcaires (FC) sur le comportement des bétons. Cette étude est basée sur la méthode de mortier équivalent [96], dont le remplacement des sables de concassage par les fines calcaires est massique sans changer les autres éléments de composition (rapport E/C, dosage en superplastifiant). Cinq mélanges de BAP dont le pourcentage de fines calcaires comme substituants au sable concassé est de l'ordre de 0, 5, 10,15 et 20%, ont été testés.

3.4 Essais effectués sur le mortier autoplaçant

3.4.1 Essai d'étalement au Mini-Cône

Pour la détermination de l'étalement du mortier, un cône tronconique, dont les dimensions sont définies sur la figure 3.9, est placé au centre d'une plaque en acier horizontale, lisse ; une fois le moule soulevé le mortier s'écoule sur la plaque. Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne. (D_{moyen}). Le (D_{moyen}) est calculé comme suit :

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3.2)$$

La tendance à la ségrégation et au ressuage peut être détectée visuellement ; le sable doit être réparti uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

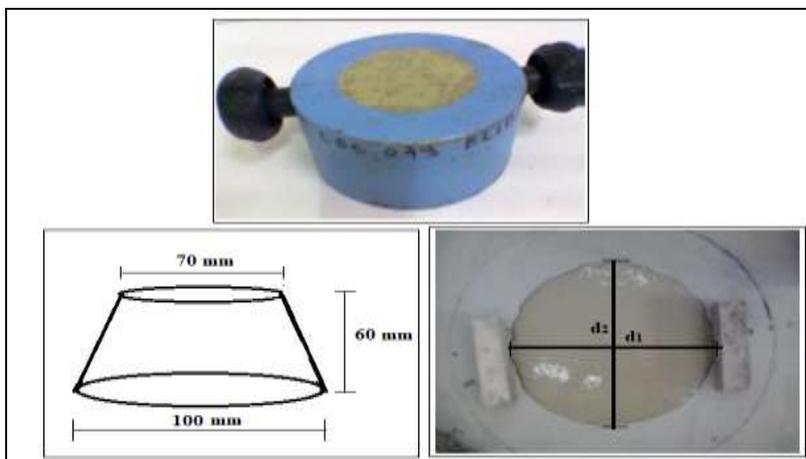


Figure 3.9: Essai d'étalement pour mortier autoplaçant.

3.4.2 Essai à l'entonnoir en V (V-funnel test)

L'appareil se compose d'un entonnoir en V dont les dimensions sont présentées dans la figure 3.10. L'essai consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier puis calculer le temps d'écoulement parcouru entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière observée verticalement vers le bas de l'entonnoir. Au cours de l'écoulement du mortier à travers l'entonnoir, un simple changement de vitesse est un signe de blocage, et par conséquent, une ségrégation dans le mortier.

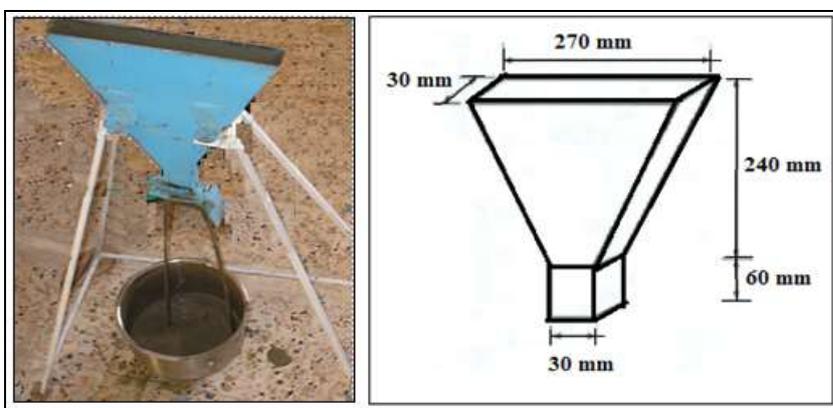


Figure 3.10: Essai à l'entonnoir en V pour mortier.

Des études sur mortiers à base de matériaux japonais ont montré que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement compris entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10 sec produisent un bon MAP. D'autres chercheurs ont trouvé une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec [96].

3.5 Essais effectués sur BAP à l'état frais

Un béton est dit autoplaçant s'il est qualifié à l'état frais par les principales caractéristiques suivantes [4].

- La mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement au cône d'Abrams et V-funnel) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrite par l'essai d'écoulement à la boîte en L) ;
- La stabilité (décrite par l'essai de stabilité au tamis).

Les essais qui ont été réalisés dans le cadre de cette étude et qui sont présentés ci-dessous caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais.

3.5.1 Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement consiste à remplir un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée (Figure 3.11). Une fois que le cône est soulevé lentement vers le haut, le béton s'écoule.

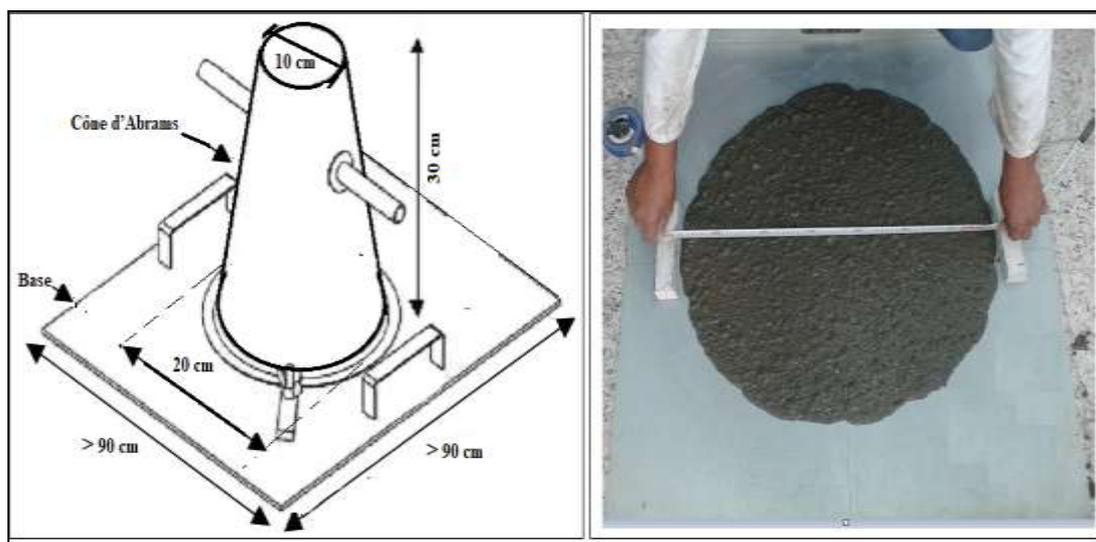


Figure 3.11 : Dispositif de l'essai et mesure de l'étalement.

Le premier résultat de cet essai est exprimé par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton obtenue. Il nous informe sur la déformabilité du béton. Cet essai est complété par la mesure du temps pris par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50 cm et qui nous renseigne sur la vitesse d'étalement du béton.

Selon la norme EN 12350-8 [224], les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 550 à 850 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance). En fonction du domaine d'application du BAP, les résultats d'étalement au cône d'Abrams peuvent être divisés en trois (03) catégories. Le tableau 3.4 illustre ces trois classes.

Tableau 3.4 : Classification des BAP selon le domaine d'application [224]

| Classe | Etalement (en mm) | Domaine d'application de BAP |
|--------|----------------------|---|
| SF1 | 550 – 650 | - Structures non ou peu ferraiillées, béton coulé à partir du haut (ex. les dalles) ; - Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels) ; - Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes). |
| SF2 | 660 – 750 | - La majorité des applications. |
| SF3 | 760 – 850 | - Applications verticales ; - Structures trop ferraiillées. ; - Coulage à partir du dessous du coffrage ; - Structures de forme complexe. |

3.5.2 Essai à l'entonnoir en V (V-funnel test)

L'essai à l'entonnoir en V sert à vérifier la mobilité d'un béton dans un milieu confiné en testant la capacité de passage d'un mélange de 12 litres de volume à travers un entonnoir en forme de V dont les dimensions sont données dans la Figure 3.12 et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libérée et le moment où l'on aperçoit la lumière par l'orifice. Ce temps d'écoulement est un critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. S'il y a ségrégation, on observera alors un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop

visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important. Deux classes de viscosité suivant le temps d'écoulement sont données comme suit [225] :

- VS1/VF1 si le temps d'écoulement « t » est inférieur à 8 s. Cette classe correspond à $T_{500} \leq 2$ sec.
- VS2/VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 s. Cette classe correspond à $T_{500} > 2$ sec.

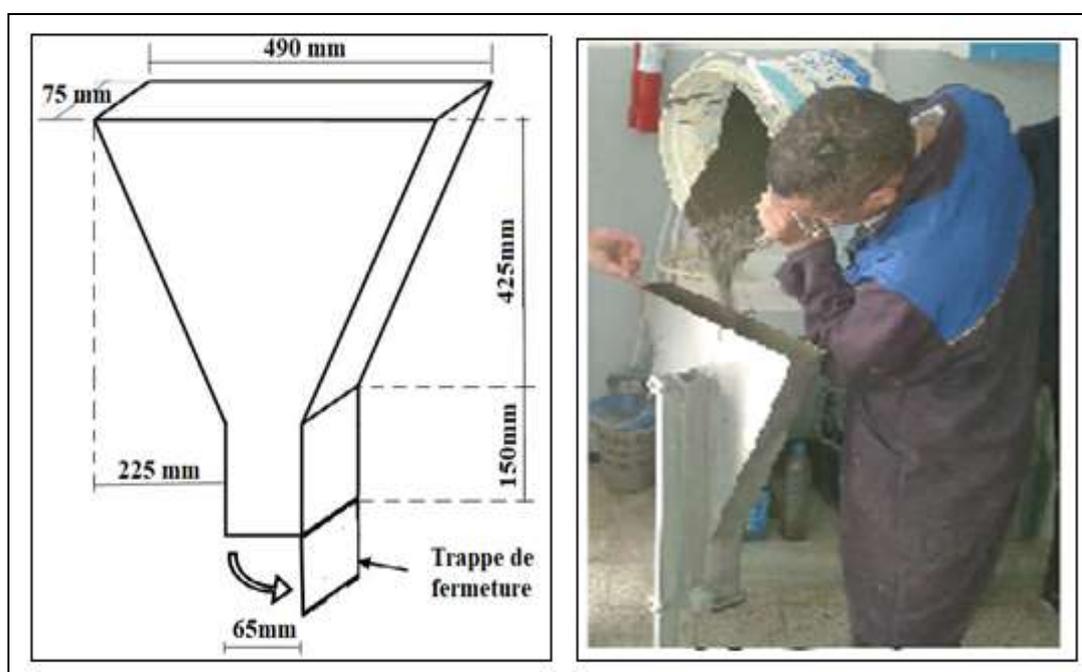


Figure 3.12: Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel).

3.5.3 Essai à la boîte en L (L-Box test)

L'essai à la boîte en L permet de tester la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant dans un milieu fortement ferrailé ou situé dans des zones difficilement accessibles. Cet essai consiste à mesurer l'écoulement du béton dans une boîte en L dont les dimensions sont présentées dans la figure 3.13. On place environ 12,7 litres de béton dans la « tour » de l'appareil. On peut éventuellement laisser le béton au repos une (1) minute pour voir s'il y a de la ségrégation. Ensuite on ouvre la trappe de fermeture et on mesure, en seconde, le temps que met l'échantillon de béton à s'écouler sur la longueur horizontale de la boîte en L. Grâce à ce test, on peut

caractériser la viscosité du mélange. De plus, lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Si, par contre, on observe une bonne distribution des gros granulats tout au long de la partie horizontale de la boîte en L, cela signifie que ce béton est homogène.

À la fin de l'essai, les hauteurs de béton, aux deux extrêmes de la boîte, sont mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport H2/H1 permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8 [226].

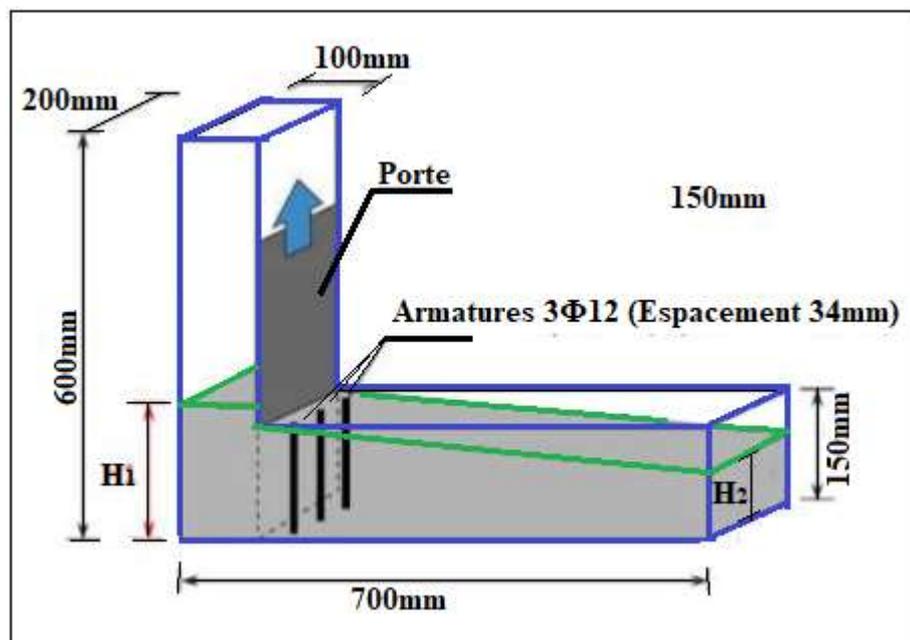


Figure 3.13: Appareil de la boîte en L.

3.5.4 Essai de stabilité au tamis

L'essai au tamis veille à tester l'aptitude d'un BAP à rester homogène depuis sa mise en place jusqu'au début de prise. Pendant cet intervalle de temps, le BAP doit maintenir sa stabilité sous l'effet de la gravité et ne doit pas présenter de signes de ressuage. L'essai consiste à prélever une quantité de béton frais d'un échantillon de 10 litres qu'on a laissé reposer pendant 15 minutes, puis on la déverse sur un tamis (mailles de 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm et on attend 2 minutes, le pourcentage de la laitance qui traverse le tamis est calculé selon l'expression suivante : (Figure 3.14)

$$\Pi = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$, la stabilité est satisfaisante
- $15 < \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.

Lorsque $0 \leq \Pi \leq 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise [227]. On peut en conclure que l'essai est sensible aux variations de dosage en superplastifiant ou en eau.

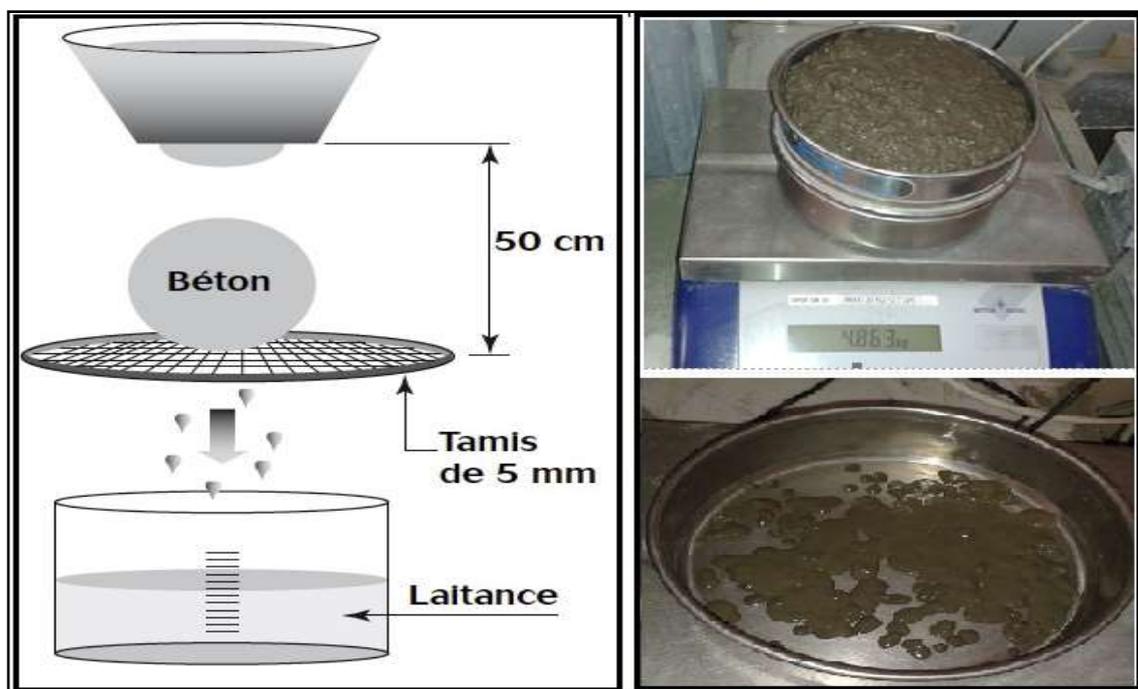


Figure 3.14 : Essai au tamis.

3.5.5 Mesure de la perte d'ouvrabilité

La perte d'ouvrabilité a été estimée, en fonction du temps, par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, à des temps différents, jusqu'à ne plus obtenir un béton autoplaçant. Dans cette étude l'étalement a été pris à 0, 30, 60 et 90 minutes.

3.5.6 Essai de rhéologie

Divers rhéomètres ont été développés pour la caractérisation du comportement des bétons à l'état frais. Pour déterminer les grandeurs rhéologiques des bétons autoplaçants à l'état frais, nous avons utilisé dans cette étude un rhéomètre à béton Heidolph- RZR 2102 Control Z, du type couette développée par l'équipe de recherche de l'université de

Cergy Pontoise [228], ce type est généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions concentrées possédant un seuil de cisaillement [229]. Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, un croisillon à deux plaques perpendiculaires en forme de U inversée, de dimensions 5x10 cm, et d'un récipient cylindrique de dimension 30 x 30 cm. La figure 3.15 présente les composants de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur.

Le principe de l'essai est de mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre car son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre, ce qui est un avantage pour les matériaux thixotropes comme le mortier [230].

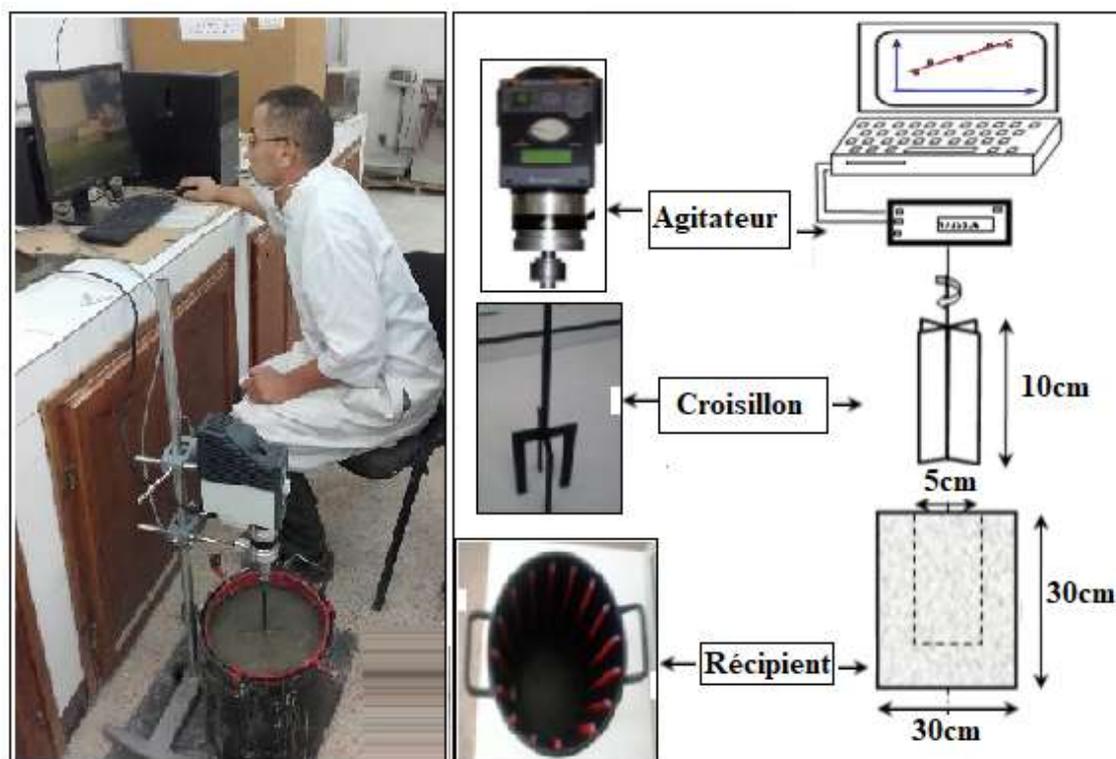


Figure 3.15 : Rhéomètre et leurs composants.

L'essai sert à verser le BAP préparé dans le récipient, puis placer le croisillon au centre du récipient d'une façon que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du béton, et par la suite démarrer l'agitateur qui provoque la rotation du croisillon suivant un profil de vitesse approprié à l'aide d'un logiciel.

Le profil de vitesse choisi permet d'obtenir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Ce profil de vitesse est illustré sur la figure 3.16 [231]. Il doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires (Ω , M).

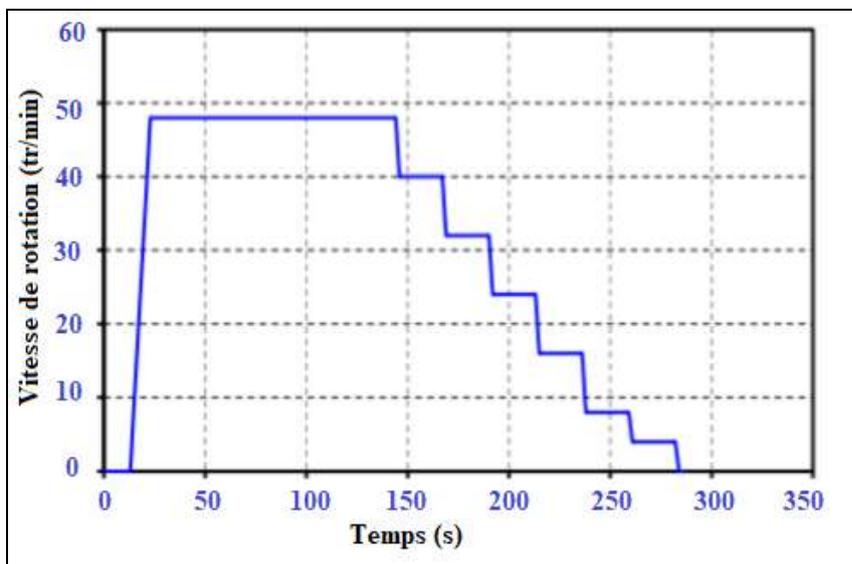


Figure 3.16: Profil de vitesse [231].

3.6 Préparation et conservation des éprouvettes

Après le coulage des mélanges de BAP, un échantillon de béton a été mis dans des moules puis arasé et protégé par un film plastique pour éviter toute évaporation de l'eau. La figure 3.17 présente le mode de conservation des éprouvettes.



Figure 3.17 : Conservation des éprouvettes.

Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après puis stockées dans un bac rempli d'eau à une température moyenne de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative $HR=100\%$ jusqu'à l'échéance de l'essai.

3.7 Essai effectués sur béton autoplaçant à l'état durci

3.7.1 Résistance à la compression

En général, la qualité du béton à l'état durci est jugée par le résultat de l'essai de la résistance à la compression. En principe, cette propriété dépend directement de la composition de la pâte de ciment. Dans cette étude, la résistance à la compression est déterminée conformément à la norme NF EN 12390-3 [232].

Les essais de résistance à la compression du BAP, ont été effectués sur des éprouvettes cubiques $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$ à l'âge de 3,7, 14 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 3000 kN, et à une vitesse de chargement de 0.5 kN/s. L'éprouvette doit être placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. Le résultat de la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai correspond à la résistance caractéristique à la compression du béton étudié. La figure 3.18 présente la procédure de l'écrasement.



Figure 3.18: Essai à la compression du béton.

3.7.2 Résistance à la traction

C'est un essai destructif réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 selon les normes NF EN 12390-5 [233], il s'agit de déterminer la résistance à la flexion trois points de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de 3000 kN (Figure 3.19).



Figure 3.19: Essai de traction par flexion.

La résistance à la traction en MPa est la moyenne des résultats de trois éprouvettes. La contrainte de traction par flexion est donnée par la relation ci-dessous. La figure 3.20 montre un schéma mécanique de cet essai.

$$\sigma_t = \frac{1.8.PL}{2.a^3} \quad (3.4)$$

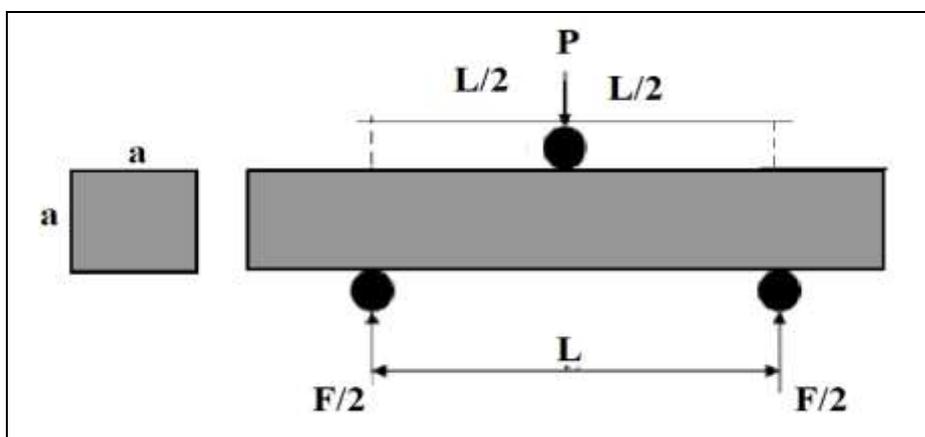


Figure 3.20: Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points.

3.7.3 Essai de porosité et de masse volumique

Le principe de l'essai consiste à mesurer la porosité accessible à l'eau sur des échantillons de BAP durcis, de forme cylindrique de 100 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur pris par coupure des éprouvettes cylindriques (100x200 mm²), par la détermination par pesées des : (figure 3.21)

- Masse apparente dans l'eau après immersion dans l'eau (pesée hydrostatique) d'une éprouvette de BAP préalablement imprégnée dans l'eau sous vide),
- La masse dans l'air du même échantillon de BAP,
- La masse à l'état sec.

Le corps d'épreuve, l'appareillage, le mode opératoire de cet essai ont été réalisés conformément à la norme NFP 18-459 [234], la porosité accessible à l'eau (ε_{acc}) et la masse volumique apparente (ρ_{app}) sont données selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (3.5)$$

$$\rho_{app} = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau} \quad (3.6)$$



Figure 3.21 : Essais de porosité accessible à l'eau.

3.7.4 Essai d'absorption capillaire

Le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert est lié simultanément à la structure poreuse et à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). L'essai d'absorption capillaire consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par succion capillaire dans un échantillon de béton durci et non saturé, mis en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Dans notre étude, les éprouvettes de BAP testées étaient de forme cylindrique de 100 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur, elles ont été conservées dans une étuve ventilée à 80 ± 2 °C, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit inférieure à 0.1%. Les parois latérales des éprouvettes ont été couvertes par une résine du type Meda Poxxy Colle pour garantir l'écoulement unidirectionnel et empêcher l'évaporation latérale de l'eau absorbée.

Les éprouvettes ont été placées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide des cales (Figure 3.22). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 1mn, 5mn, 10 mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h [235].

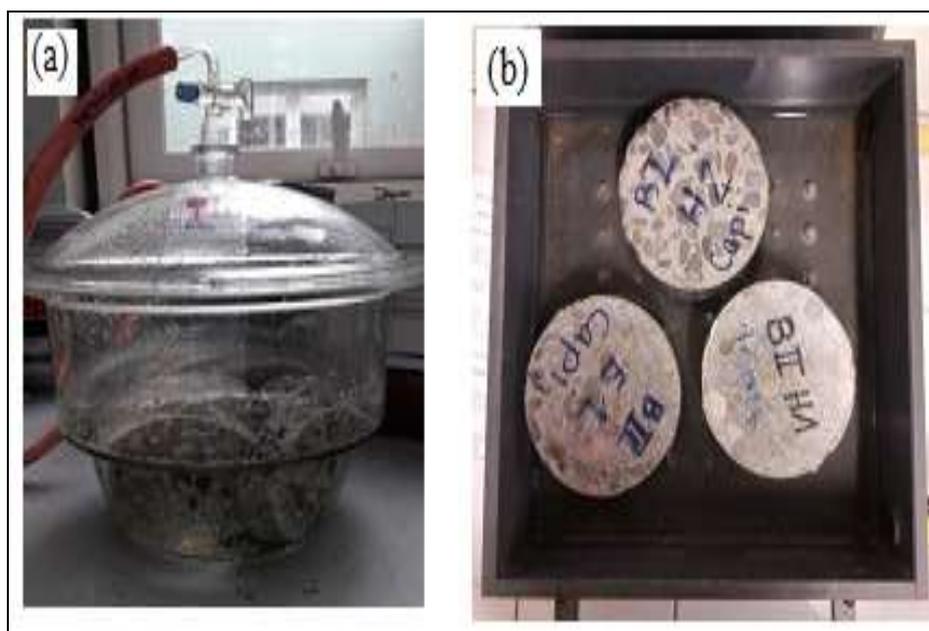


Figure 3.22 : Essai d'absorption capillaire

Le coefficient de sportivité (s) du béton peut être déterminé par l'expression suivante :

$$S = (Q/A)/\sqrt{t} \quad (3.7)$$

Où : A : Surface du spécimen en contact avec l'eau en cm²,

Q : Volume d'eau absorbé en cm³,

t : Temps écoulé en (s),

S : coefficient de sorptivité du spécimen en cm/s^{1/2}.

3.7.5 Essai de diffusion des ions de chlorure

Pour l'essai de diffusion des ions chlorures, c'est le mode opératoire de l'essai de migration en régime transitoire recommandé par la norme NT BUILD 492 (1999) [236], qui a été choisi. Il consiste à appliquer une différence de potentiel (60V) pendant 6 heures afin de faire pénétrer les ions par migration et, toutes les 30 minutes, on mesure l'intensité du courant qui traverse l'échantillon. Pendant l'essai, la température a été maintenue constante (T=20 ±2°C). L'essai a été réalisé sur des échantillons cylindriques sciés de dimensions (Ø 100×50 mm) et ensuite saturés par une solution 0,1 M NaOH pendant 24 heures puis disposés entre deux cellules remplies en amont par une solution en chlorures (5% NaCl) et en aval par (3% NaOH). (Figure 3.23). Le calcul du coefficient de diffusion effectif (D_{nSSm}) d'un corps d'épreuve s'effectue selon la formule suivante :

$$D_{nSSm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad (3.8)$$

Où :

D_{nSSm}: est le coefficient de diffusion effectif (×10⁻¹² m²/s) ;

U: Tension appliquée (V) ;

T: Température de la solution (°C) ;

L: Epaisseur de l'échantillon (mm) ;

X_d: Profondeur de pénétration (mm) ;

t: Durée de l'essai (heurs).

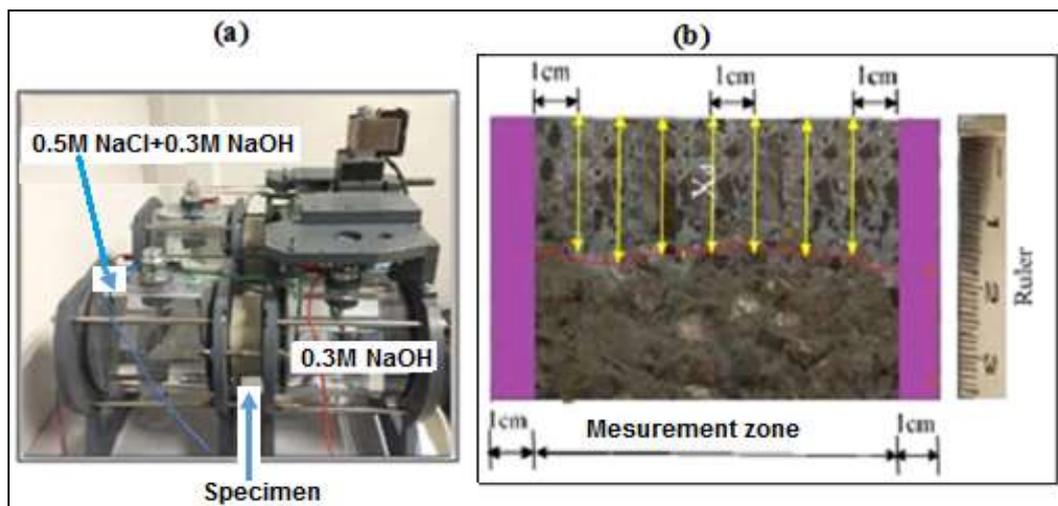


Figure 3.23 : Essai de la diffusion des ions de chlorures.

3.8 Récapitulatif des essais

Cette étude traite l'effet du calcaire en tant que remplacement partiel du sable concassé pour le béton auto-compactant (BAP) avec un pourcentage de 0, 5, 10, 15 et 20%. Le rapport eau sur liant a été fixé à 0,40 avec un rapport sable / mortier de 0,5 et un rapport granulats grossiers / sable de 0,8. Le superplastifiant (SP) a été utilisé avec une quantité fixe de 1,4% en masse de liant. Les propriétés à l'état frais du BAP ont été étudiées par le biais d'un test d'écoulement d'affaissement (Etalement, T500), d'un test d'entonnoir en V (Tv-funnel), d'un test de la boîte en L (rapport H2/H1) et d'un test de rhéologie (pour la contrainte de cisaillement, la limite d'élasticité et la viscosité plastique). Les propriétés du BAP à l'état durci ont été examinées par un test de résistance à la compression et un test de résistance à la traction par flexion. La durabilité du BAP a été testée par des essais de porosité, d'absorption d'eau et de diffusion des ions de chlorure, l'organigramme suivant récapitule les différents essais réalisés (Figure 3.24).

3.9 Conclusion

La formulation d'un BAP, nécessite une étude précise notamment dans le choix de ses constituants (sable, gravier, ciment, adjuvants...), et l'optimisation des paramètres influant sur la formulation du BAP. Des essais à l'état frais ont été définis, tels les essais d'ouvrabilité et de rhéologie, et à l'état durci comme la résistance à la compression et à la traction. D'autres concernant les propriétés de transfert avec, par exemple, les essais de porosité accessible à l'eau, d'absorption capillaire et de diffusion des ions chlorures ont été également présentés.

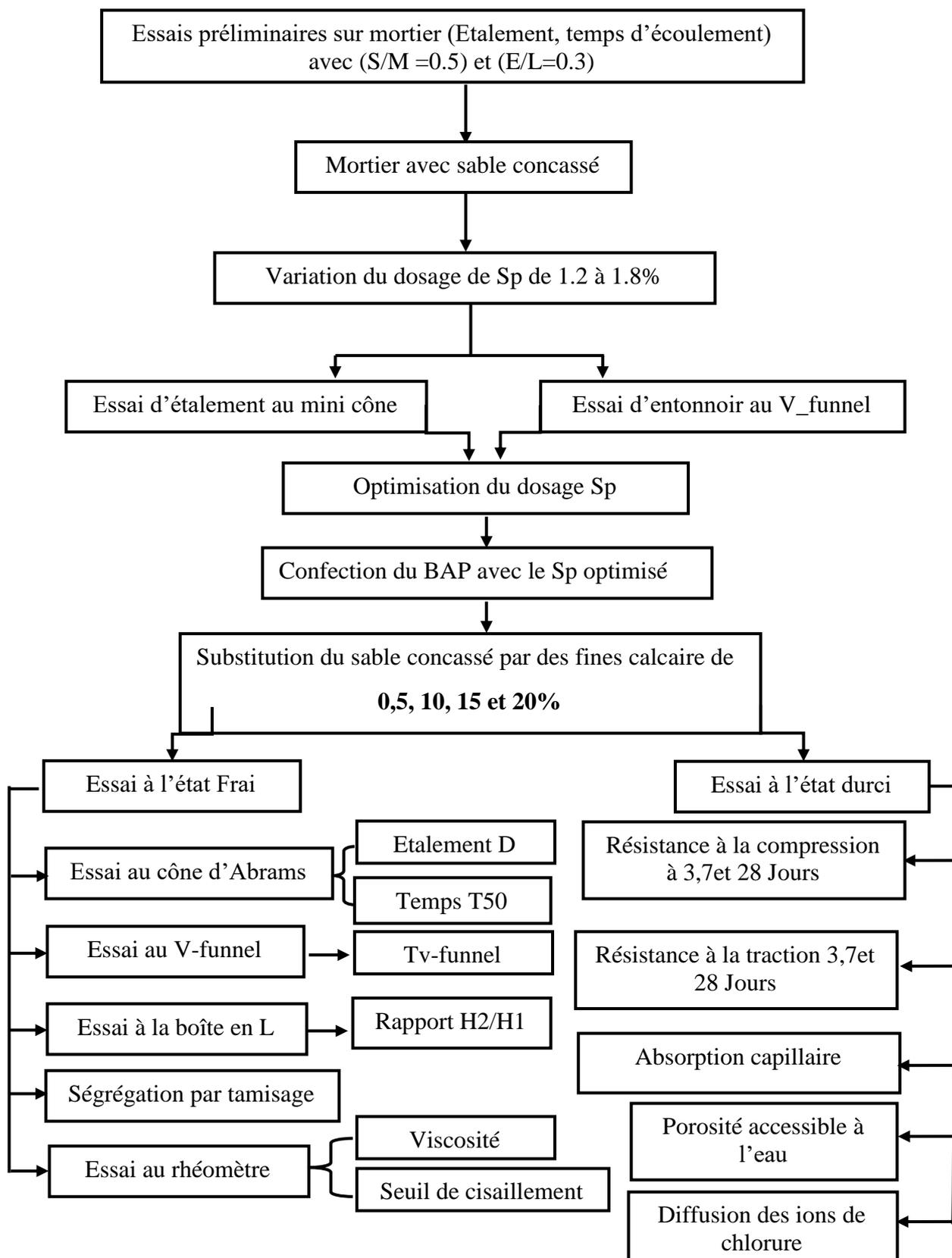


Figure 3.24 : Organigramme des essais réalisés.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Le présent chapitre s'intéresse à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus lors des différentes séries d'essais effectuées sur les bétons et les mortiers examinés à l'état frais et durci. Les essais sur mortier ont été d'abord réalisés, dans un premier temps, afin d'optimiser le rapport sable/mortier (S/M), puis le rapport superplastifiant sur liant (Sp/L) que l'on pourra utiliser, par la suite, dans la formulation du béton autoplaçant (BAP). La seconde étape s'intéresse à l'étude des résultats des essais effectués sur le béton après avoir fixé tous les paramètres dont la substitution du sable concassé par les fines calcaires (FC) est incluse. L'effet des fines calcaires sur l'ouvrabilité et les propriétés rhéologiques du béton frais, ainsi que les caractéristiques mécaniques et de durabilité du béton à l'état durci ont été présentés et analysés.

4.2 Optimisation du rapport Sable/Mortier (S/M)

L'objectif d'optimisation du rapport Sable/Mortier est de développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour garantir la meilleure performance du béton autoplaçant à l'état frais et durci. L'essai consiste à :

- 1- Fixer le rapport Eau/Ciment ($E/C=0.4$) ;
- 2- Faire varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L) ;
- 3- Rechercher la composition optimale pour les différents rapports Sable/Mortier de 0.40, 0.45 et 0.50, où le sable concassé est substitué à 0 et 20% de fines calcaires.

Plusieurs tentatives de formulation de mortiers autoplaçants ont été réalisées. Les meilleures formulations obtenues en fonction du rapport S/M et les résultats des essais d'étalement au mini-cône sont présentés dans le Tableau 4.1.

Selon le tableau 4.1, il a été constaté que le mortier M9 avec le rapport (S/M) de 0.5 présente la meilleure performance au mortier, à savoir la résistance à la ségrégation et au ressuage, par rapport aux autres mortiers avec les rapports (S/M) de 0.45 et 0.40.

Pour le mortier avec le rapport (S/M) de 0.4, nous avons remarqué deux cas : (a) une ségrégation et un ressuaage très importants dont la quantité de fines calcaires dans le sable est nulle ce qui empêche l'homogénéité et la cohésion entre les différents composants du mortier, (b) pour la substitution de 20% de sable concassé par des fines calcaires, le mortier est devenu trop sec et aucune fluidité n'a été observée, ce qui nécessite comme première solution l'augmentation du dosage du superplastifiant de 0.8 à 1.4. Pour les deux cas, on constate une augmentation de l'étalement de 290 à 310 mm, cependant, les signes d'un mortier autoplaçant pour le deuxième cas ne sont pas observés et par conséquent, il n'y a pas de possibilité de le produire avec le rapport (S/M) de 0.4.

Tableau 4.1 : Résultats d'optimisation du mortier autoplaçant

| Compositions | | Rapport Sable/Mortier (S/M) | | | | | | | | |
|--|-------|-----------------------------|--------|------|------|------|--------|--------|--------|------|
| | | 0.4 | | | 0.45 | | | 0.5 | | |
| | | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
| Ciment (kg/m ³) | | 642 | 642 | 642 | 588 | 588 | 588 | 535 | 535 | 535 |
| Sable (kg/m ³) | | 806 | 806 | 806 | 907 | 907 | 907 | 1008 | 1008 | 1008 |
| Eau (kg/m ³) | | 267 | 266 | 264 | 248 | 247 | 245 | 228 | 228 | 226 |
| Superplastifiant (kg/m ³) | | 5.13 | 6.42 | 8.98 | 4.71 | 5.88 | 8.23 | 4.28 | 5.32 | 7.49 |
| Etalement (mm) | 0% FC | 200 | 210 | 230 | 250 | 260 | 270 | 280 | 295 | 230 |
| | 20 FC | Ferme | Ferme | 150 | 200 | 210 | 230 | 250 | 260 | 275 |
| Ségrégation | 0% FC | ok | un peu | / | / | ok | un peu | / | / | / |
| | 20 FC | / | / | / | / | / | / | un peu | / | / |
| Ressuaage | 0% FC | un peu | ok | / | ok | ok | ok | / | un peu | / |
| | 20 FC | / | / | / | / | / | / | / | / | / |
| M1 (Sp=0.8%), M2 (Sp=1%), M3(Sp=1.4%), M4 (Sp=0.8%),M5 (Sp=1%), M6(Sp=1.4%),M7 (Sp=0.8%),M8 (Sp=1%),M9(Sp=1.4%). | | | | | | | | | | |

L'augmentation du rapport (S/M) de 0.4 à 0.45 conduit à une augmentation du volume de sable, et par conséquent, à la diminution du volume de la pâte de ciment, ce qui influe significativement sur la fluidité. Le mortier avec 0% de fines calcaires présente une fluidité acceptable avec faibles ressuaage et ségrégation. L'augmentation du dosage de fines calcaires dans le sable de concassage de 0 à 20% donne des mortiers à fluidité insuffisante, mais sans ressuaage et ségrégation ; cela peut être expliqué par

l'augmentation des paramètres rhéologiques (viscosité plastique et seuil de cisaillement). Ces résultats coïncident avec les études de Westerholm M et al. [236] qui montrent que l'incorporation d'une grande quantité de sable riche en fines dans le mortier influe sur la rhéologie de ce dernier. De plus, elle augmente le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique. D'autres chercheurs [238] préconisent un rapport S/M entre 0.45 et 0.48 afin de produire un BAP à haute performance. Cependant, Spengler et Schiessl [239] ont formulé, avec un rapport E/C de 0.5, un bon BAP riche en sable avec quatre fois plus le gravier (80% sable et 20% gravier). Par conséquent, pour les différents essais sur le béton, le rapport (S/M) a été fixé à 0.50.

La production d'un mortier autoplaçant avec le rapport (S/M) de 0.45, le dosage en superplastifiant allant de 0.8 à 1.4 et la concomitance entre le dosage de 0 et 20% de fines calcaire dans le sable concassé, n'est pas faisable comme résultat, vu la ségrégation, le ressuage et la fluidité insuffisante déjà constatés. Donc, le meilleur résultat obtenu est avec le rapport (S/M) de 0.5, on peut combiner entre les deux pourcentages (0 et 20%) de fines calcaires dans le sable de concassage afin de produire un mortier autoplaçant. Les valeurs trouvées montrent que pour un dosage de 1.4% de superplastifiant, une convergence d'étalement entre les mortiers de 0% et 20% de FC a été constatée. Cet étalement était de 350 et 290 mm pour les mortiers respectivement de 0 et 20% de fines calcaire dans le sable, sans aucun signe de ressuage ou de ségrégation. L'emploi des superplastifiants permet de réduire la teneur en eau et par, conséquent, la déformabilité, la stabilité et les performances mécaniques des BAP sont améliorées.

Le superplastifiant ajouté au mortier agit par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et de créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique. Cela permet de libérer une partie de l'eau piégée par les grains de ciment flocculés et diminuer ainsi les frictions inter-granulaires.

À partir des essais sur mortier, on détermine le dosage optimal de superplastifiant apte à doter un maximum d'ouvrabilité au mortier sans ségrégation et sans ressuage. Ceci permet de simplifier la formulation du béton et de garantir, également, des propriétés suffisantes au BAP à l'état frais et durci.

L'essai d'optimisation de superplastifiant consiste à réaliser quelques essais relatifs au mortier afin d'optimiser le rapport Sp/L pour l'utiliser par la suite dans la formulation

du BAP. Selon les travaux de Boukendakdji [191], nous avons fixé le rapport (S/M) égal à 0.5 et E/C égal à 0.4 en faisant varier le rapport Sp/L. Pour chaque dosage en superplastifiant, des mesures d'étalement ont été effectuées.

Dans notre étude, le rapport Sp/L était ajusté par l'essai d'étalement seul, le diamètre obtenu des galettes des deux mortiers de référence (0% et 20% de FC) devant être compris entre $270 \text{ mm} \leq d \leq 330 \text{ mm}$ [96].

4.3 Effet du taux de substitution des SC par des FC sur l'ouvrabilité des BAP

L'effet du taux de fines présent dans le sable de concassage à l'état frais est examiné à travers des essais particuliers sur le BAP qui nous permettent d'analyser la relation de l'ouvrabilité avec le dosage dosage du mélange en fines calcaires. Dans cette partie de ce chapitre, un suivi visuel de la ségrégation et du ressuage a été effectué. Les séries des BAP formulés avec différents dosages de FC (de 0% à 20%) dans le SC sont montrées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Compositions des mélanges de BAP

| | | BAP0 | BAP5 | BAP10 | BAP15 | BAP20 |
|-----------------------------------|----------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Ciment (kg/m ³) | | 490 | 490 | 490 | 490 | 490 |
| Fines calcaires | (%) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| | (kg/m ³) | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 |
| Gravier 3/8 (kg/m ³) | | 443 | 443 | 443 | 443 | 443 |
| Gravier 8/15 (kg/m ³) | | 295 | 295 | 295 | 295 | 295 |
| Sable (kg/m ³) | Sable concassé (SC) | 600 | 570 | 540 | 510 | 480 |
| | Sable siliceux (SS) | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 |
| Eau | (kg/m ³) | 196 | 196 | 196 | 196 | 196 |
| Super-plastifiant | (%) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| | (kg/m ³) | 6.86 | 6.86 | 6.86 | 6.86 | 6.86 |

La caractérisation de ces bétons a été testée conformément aux procédures décrites par les guides Européens du BAP [97] dont les valeurs limites sont données dans le tableau 4.3. Les résultats des essais de caractérisation du comportement des bétons autoplaçants fabriqués lors de cette étude sont regroupés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.3 : Valeurs limites des essais du BAP [97]

| Essais | | Classe | Valeurs limites |
|----------------------|---|---------|-------------------------|
| Essai d'Étalement | Étalement (mm) | SF1 | 550- 560 |
| | | SF2 | 660-750 |
| | | SF3 | 760-780 |
| | Temps d'écoulement T500 (s) | VS1/VF1 | ≤ 2 |
| | | VS2/VF2 | > 2 |
| Essai V-funnel | Temps d'écoulement (s) | VS1/VF1 | ≤ 8 |
| | | VS2/VF2 | 9-25 |
| Essai L-Box | Rapport des Hauteurs (H2/H1) | PA1 | ≥ 0.8 avec deux barres |
| | | PA2 | ≥ 0.8 avec trois barres |
| Essai de ségrégation | Laitance passant à travers le Tamis (%) | SR1 | ≤ 20 |
| | | SR2 | ≤ 15 |

Tableau 4.4 : Résultats récapitulatifs des essais d'ouvrabilité

| | | BAP0 | BAP5 | BAP10 | BAP15 | BAP20 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Étalement (0 min) | T500 | 1.28 | 2.45 | 2.15 | 2.02 | 2.24 |
| | D1 | 85 | 84 | 74.4 | 75.3 | 68 |
| | D2 | 84 | 83 | 73.3 | 73.4 | 65 |
| Dmoy | | 84.5 | 83.5 | 73.85 | 74.35 | 66.5 |
| Tv funnel (s) | | 4.72 | 6.1 | 6.46 | 6.75 | 5.87 |
| L-BOX | H2 | 9.1 | 9.6 | 9.2 | 9.4 | 9 |
| | H1 | 8.7 | 9.4 | 8.9 | 8.2 | 8.06 |
| | H2/H1 | 0.956 | 0.979 | 0.967 | 0.872 | 0.896 |
| Laitance | PL | 100 | 95 | 92 | 78 | 72 |
| | PE | 3024 | 3545 | 3690 | 3587 | 3537 |
| | % L | 3.024 | 2.67 | 2.49 | 2.17 | 2.03 |
| Étalement (30 min) | T50 | 1.77 | 2.97 | 3.2 | 2.09 | 2.52 |
| | D1 | 79 | 77 | 69 | 68 | 50 |
| | D2 | 82 | 75 | 67 | 64 | 52 |
| Dmoy | | 80.5 | 76 | 68 | 66 | 51 |
| Étalement (60 min) | T50 | 2.03 | 3.25 | 4.19 | 3.2 | / |
| | D1 | 70 | 69 | 62 | 58 | / |
| | D2 | 69 | 68.5 | 63 | 57 | / |
| Dmoy | | 69.5 | 68.75 | 62.5 | 57.5 | / |
| Étalement (90 min) | T50 | 3.3 | 3.75 | 5.15 | 4.1 | / |
| | D1 | 60 | 59 | 57 | 55 | / |
| | D2 | 57 | 58 | 56 | 54 | / |
| Dmoy | | 58.5 | 58.5 | 56.5 | 54.5 | / |

4.3.1 Etalement et temps d'écoulement Tv-funnel et T500 au cône d'Abrams

Dans un premier temps, les propriétés du béton frais, autres que l'affaissement ont été évaluées selon les recommandations de l'AFGC [4]. La valeur d'affaissement n'est pas pertinente dans ce cas en raison du béton très fluide. Par ailleurs, l'attention s'est focalisée sur la mesure de l'étalement (diamètre moyen (Dmoy) du béton affaissé) et du temps d'écoulement pour obtenir le diamètre moyen de 500 mm (T500).

L'essai d'étalement est donc utilisé pour caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné. Cependant, l'essai d'écoulement au V-funnel permet de mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée pour tester sa viscosité.

Les résultats de l'étalement et le temps d'écoulement Tv-funnel des cinq mélanges de BAP avec et sans fines calcaires sont présentés dans la figure 4.1.

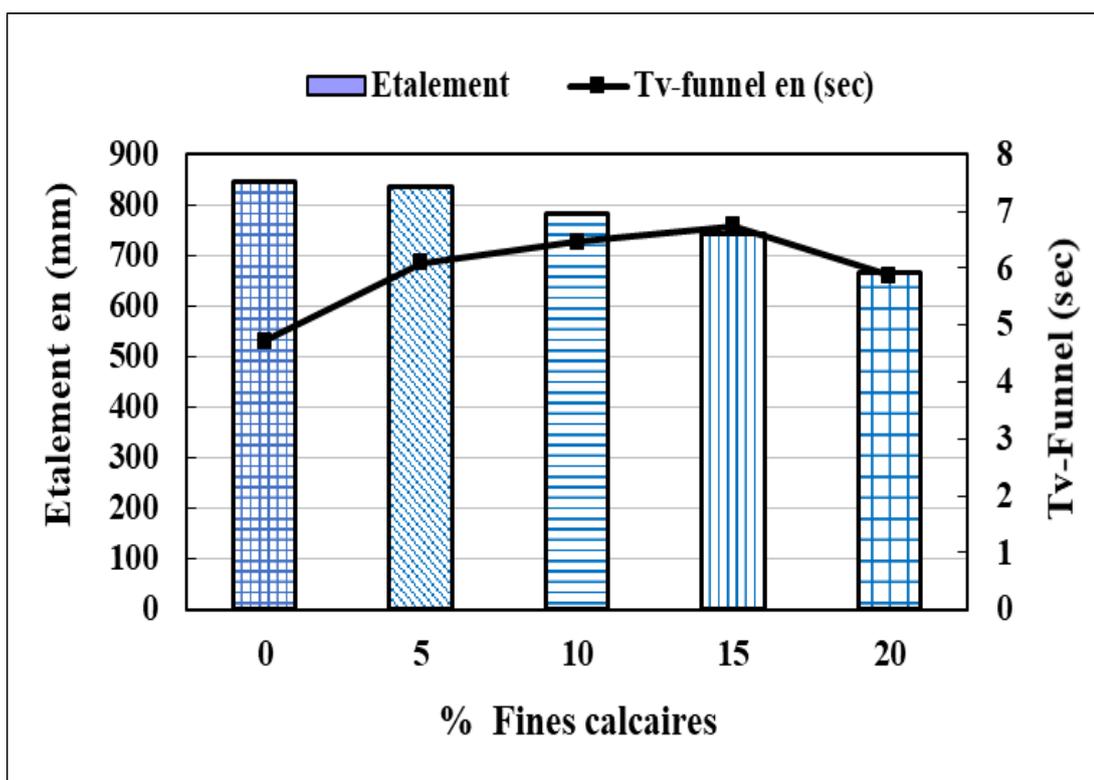


Figure 4.1 :Etalement, temps d'écoulement Tv-funnel en fonction de la teneur en fines de calcaire.

Les mesures de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement en V-funnel de tous les mélanges de BAP étudiés sont comparées avec les valeurs limites de BAP citées au tableau 4.3. Il convient de noter que tous les mélanges ont atteint un étalement

et une capacité de remplissage adéquats. L'augmentation de la teneur de fines calcaires de 0 à 20% comme substitution du sable de concassage contribue à la diminution de l'étalement de 845 à 665 mm et à l'augmentation du temps d'écoulement Tv-funnel de 4,72 à 5,87 secondes. Le meilleur étalement et le plus long temps d'écoulement en V-funnel sont remarqués pour le BAP avec 15% de fines de calcaire. La diminution de l'étalement peut s'expliquer par l'augmentation de la demande en eau pour les mélanges de BAP contenant de fines calcaires. Cela se traduit par l'augmentation de la finesse et de la surface spécifique du sable de concassage. La teneur élevée en fines dans le BAP nécessite plus d'eau pour mouiller la surface des particules et par conséquent, la fluidité diminue. Des résultats similaires sont également rapportés par d'autres chercheurs [167], [240-242].

Lors de l'essai d'étalement, on peut mesurer le temps T500, à partir du moment où l'on soulève le cône, pour que la galette de béton atteigne un diamètre de 500 mm. L'objectif, ici, est d'évaluer la vitesse d'écoulement des mélanges BAP et du temps d'écoulement T500.

La figure 4.2 montre les résultats de l'effet de la teneur en fine calcaires sur le temps d'écoulement T₅₀₀

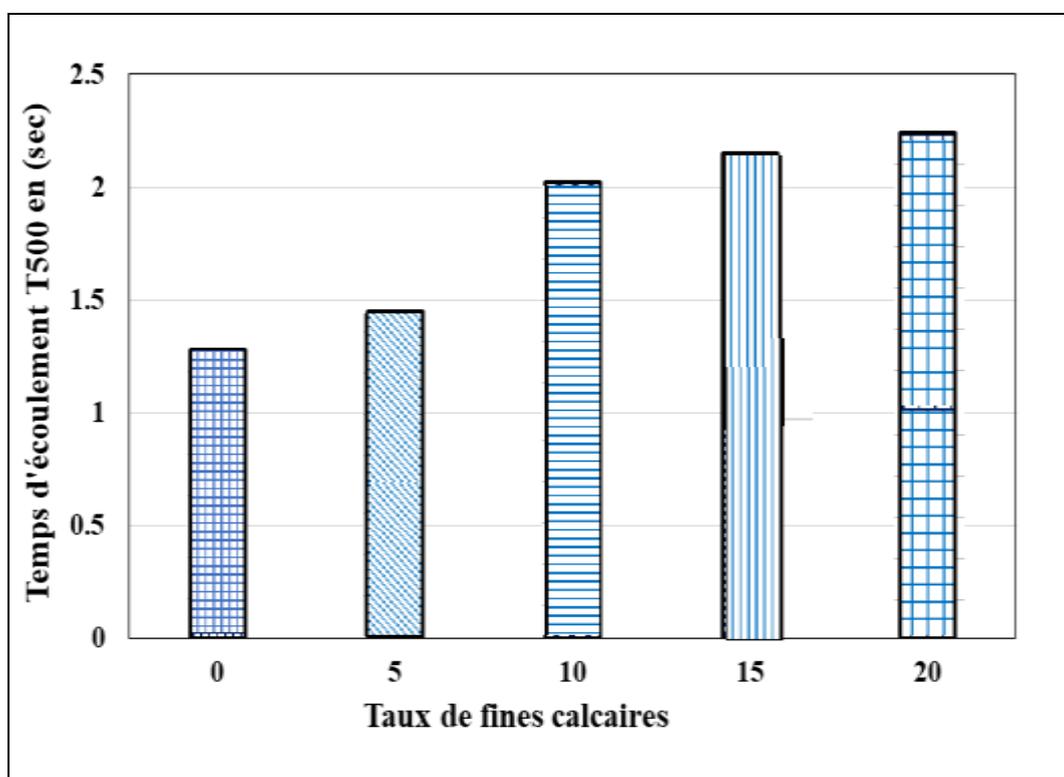


Figure 4. 2 : T500 en fonction de la teneur en fines.

. On peut observer que le temps d'écoulement T_{500} de tous les mélanges de BAP avec et sans fines se situe dans les limites requises pour le BAP. L'augmentation des fines calcaires lors du remplacement du sable de concassage diminue le temps d'écoulement T_{500} . Le mélange de BAP avec 20% de fines calcaires présente une viscosité inférieure.

4.3.2 Mesure du rapport (H2/H1) de l'essai de la boîte en L (L-Box)

La mobilité des mélanges de BAP dans des zones fortement ferrillées est liée directement à la quantité de fines incorporées dans le mélange. Afin d'évaluer la capacité de remplissage des éléments structuraux, d'autres tests ont été effectués à l'aide de la Boite en L. La différence du niveau de hauteur du béton entre le début et la fin de la boîte (H2/H1) a été mesurée. Il y a généralement un risque de blocage du mélange lorsque ce rapport est inférieur à 0,8 [243].

Cet essai donne une bonne appréciation sur les trois capacités : le remplissage, le passage et la résistance à la ségrégation. Dans notre étude, les résultats de l'essai à la boîte en L effectué sur les mélanges de BAP sont présentés dans la figure 4.3.

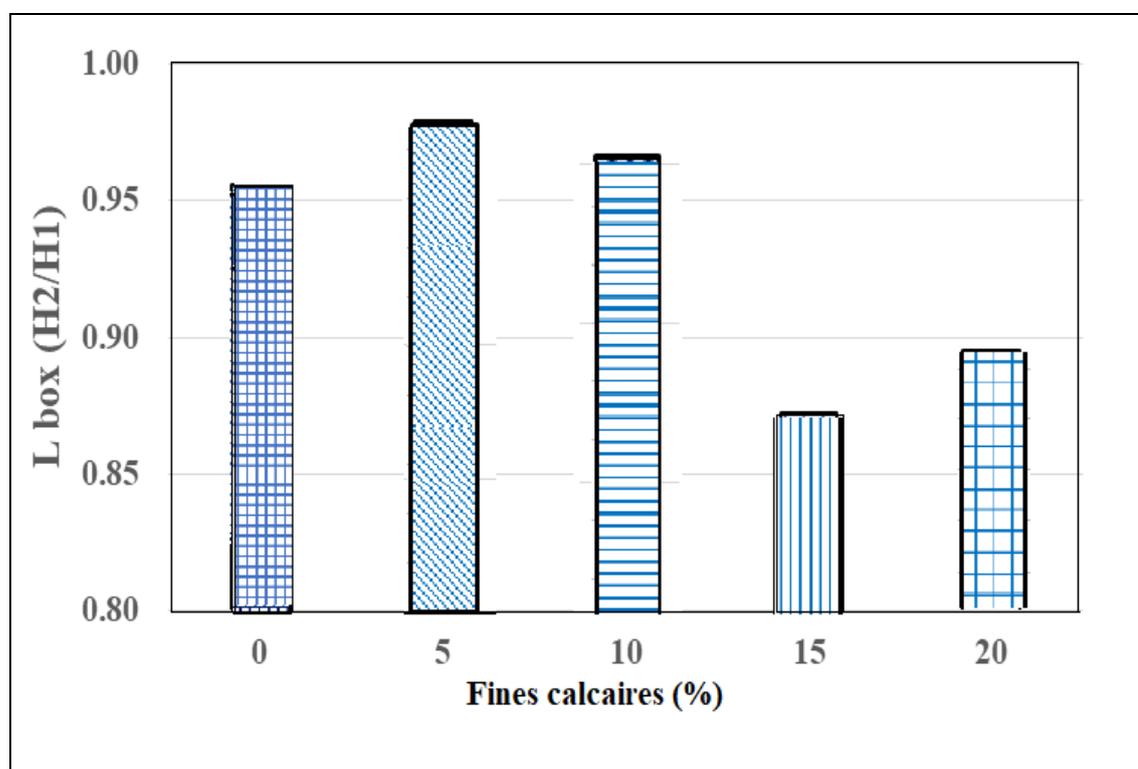


Figure 4.3 : Variation du rapport H2/H1 en fonction du % de fines calcaires.

On remarque que l'augmentation de la teneur en fines calcaires dans le sable de concassage de 0 à 10% entraîne une augmentation du rapport (H2/H1) de 0,96 à 0,97 par rapport au BAP0 de référence. La valeur la plus élevée de (H2 / H1) est remarquée pour un BAP avec 5% de fines calcaires.

De plus, on observe une réduction de la capacité de passage avec l'augmentation du taux de substitution de sable de concassage au-delà de 10%, de fines calcaires. Le faible rapport H2/H1 est remarqué pour un BAP avec 15% de fines calcaires. Les résultats obtenus montrent que tous les mélanges de BAP ne présentent aucun risque de blocage selon les directives de l'EFNARC [97].

4.3.3 Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du béton. Les bétons peuvent présenter des ségrégations pendant et après le coulage. La séparation qui survient après le bétonnage sera plus nuisible dans les éléments verticaux de hauteur importante. Elle peut conduire à des défauts de surface tels que la fissuration.

En l'absence d'expérience pertinente, des conseils généraux sur les classes de résistance à la ségrégation mesurée par l'essai de stabilité au tamis sont présentés : (a) si les classes d'étalement sont élevées et/ou la classe de viscosité est faible, la résistance à la ségrégation devient un paramètre très important, (b) si aucune de ces situations ne s'applique, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier une classe de résistance à la ségrégation. L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité du BAP à rester homogène après la mise en place (absence de chute verticale des gros granulats) jusqu'au début de prise : c'est la résistance à la ségrégation statique.

Les résultats de la résistance à la ségrégation des mélanges de BAP avec et sans FC sont illustrés dans la figure 4.4. On peut voir sur cette figure que, dans tous les mélanges de BAP, que la résistance à la ségrégation de BAP diminue avec l'augmentation de la teneur en fines calcaires.

La plus faible résistance à la ségrégation est enregistrée pour le mélange de BAP contenant la teneur de FC la plus élevée. Les résultats ont révélé que tous les mélanges de BAP présentent une résistance de ségrégation adéquate, a été spécifiée par NF EN 12350-11 [244].

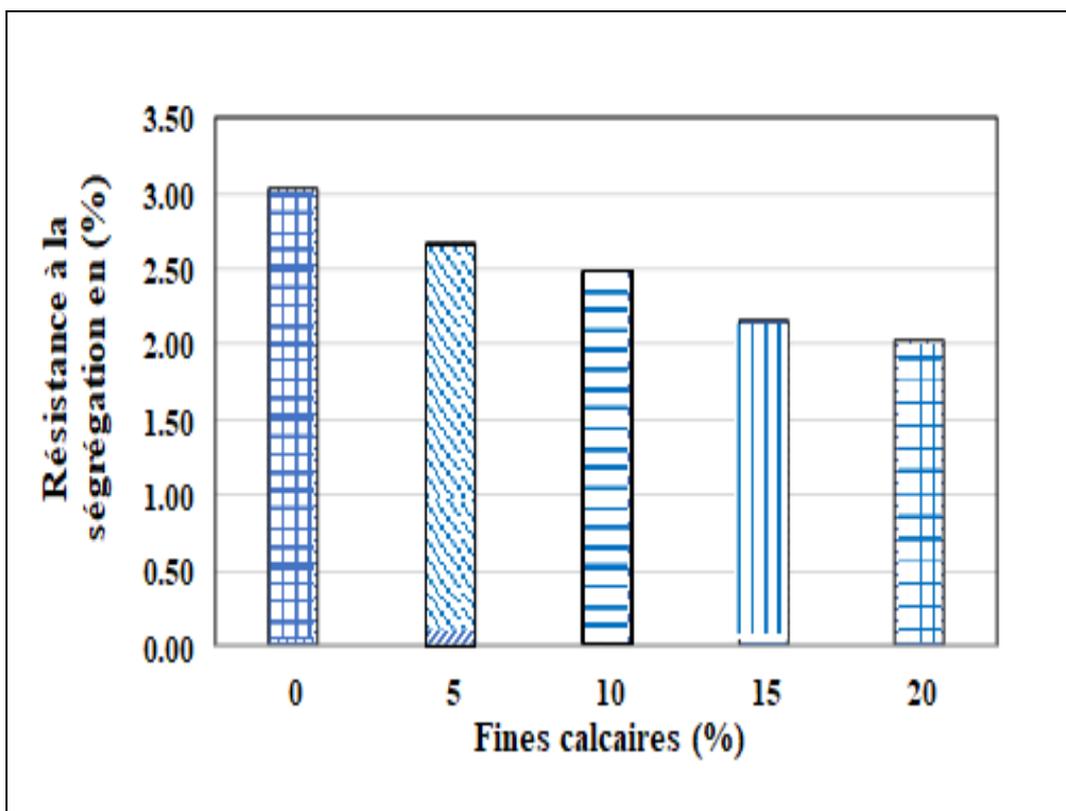


Figure 4.4 : Résistance à la ségrégation en fonction de la teneur en fines.

4.3.4 Relation entre Tv-funnel et T500

La figure 4.5 montre les valeurs expérimentales du temps d'écoulement Tv-funnel en fonction du temps d'écoulement T500 des différents mélanges de BAP à base de sable de concassage. Une fonction exponentielle est proposée entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation R^2 égal à 0,974.

L'augmentation du temps d'écoulement du V-funnel entraîne donc l'augmentation de T500. Cela, implique, également que l'essai du temps d'écoulement T500 et le temps d'écoulement de V-funnel sont adéquates pour évaluer la viscosité et la cohésion du BAP.

Cette corrélation est en concordance avec les résultats de plusieurs auteurs [245-247]. Bethmont [78] a conclu que la majorité des auteurs s'accordent sur le fait que la viscosité est bien corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-funnel et éventuellement au T500.

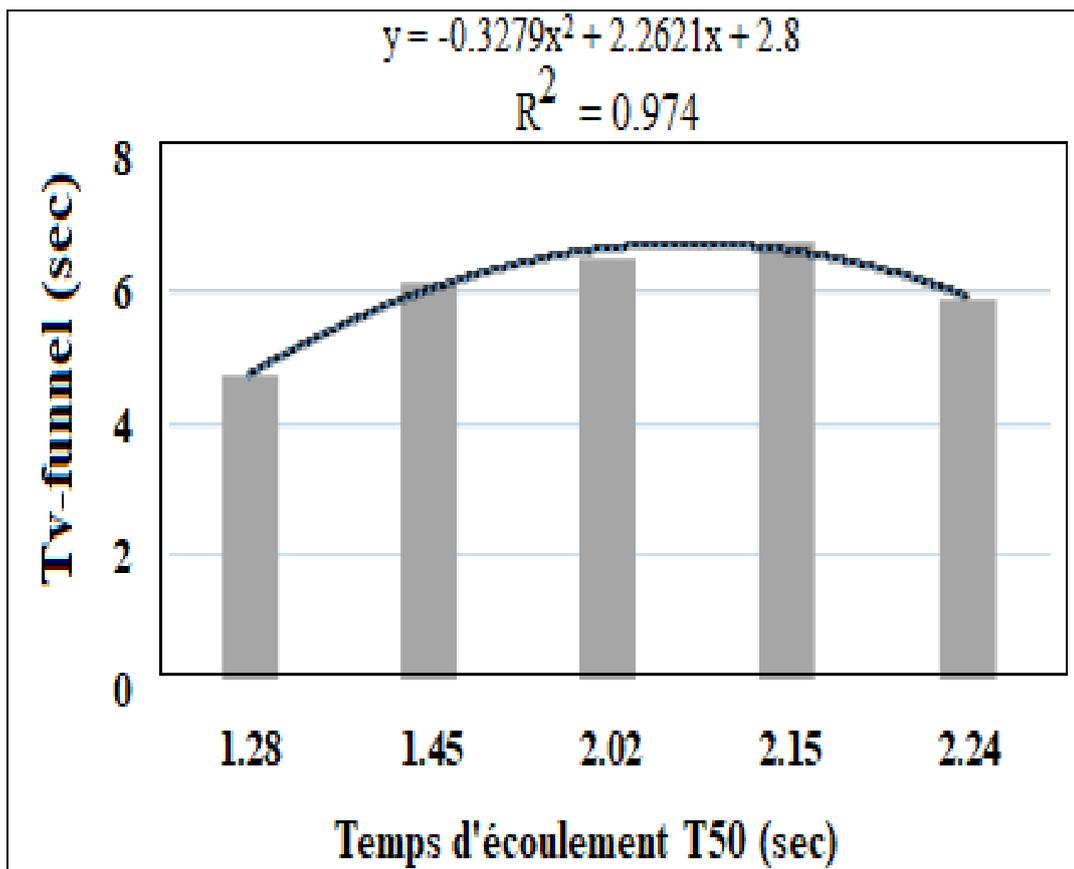


Figure 4.5 : Corrélation entre le temps d'écoulement Tv-Funnel et T500.

4.3.5 Perte d'ouvrabilité

La figure 4.6 montre la perte d'ouvrabilité en fonction du temps (à 0, 30, 60 et 90 minutes) après malaxage pour les mélanges contenant 0, 5, 10 et 15% de fines calcaires. La perte d'ouvrabilité donne la déformation du mélange en fonction du temps. Le mélange de 20% de fines calcaires n'est plus considéré comme un BAP car il a perdu son ouvrabilité 60 minutes après. Par contre, les autres mélanges sont restés ouvrables jusqu'à 90 minutes après malaxage.

Les chercheurs [152] estiment que la perte d'ouvrabilité à 70 minutes après malaxage est moins de 10%. Selon Ohno et al. [248], la perte de l'ouvrabilité est causée par la dispersion de l'adjuvant et la quantité libre d'eau dans le mélange.

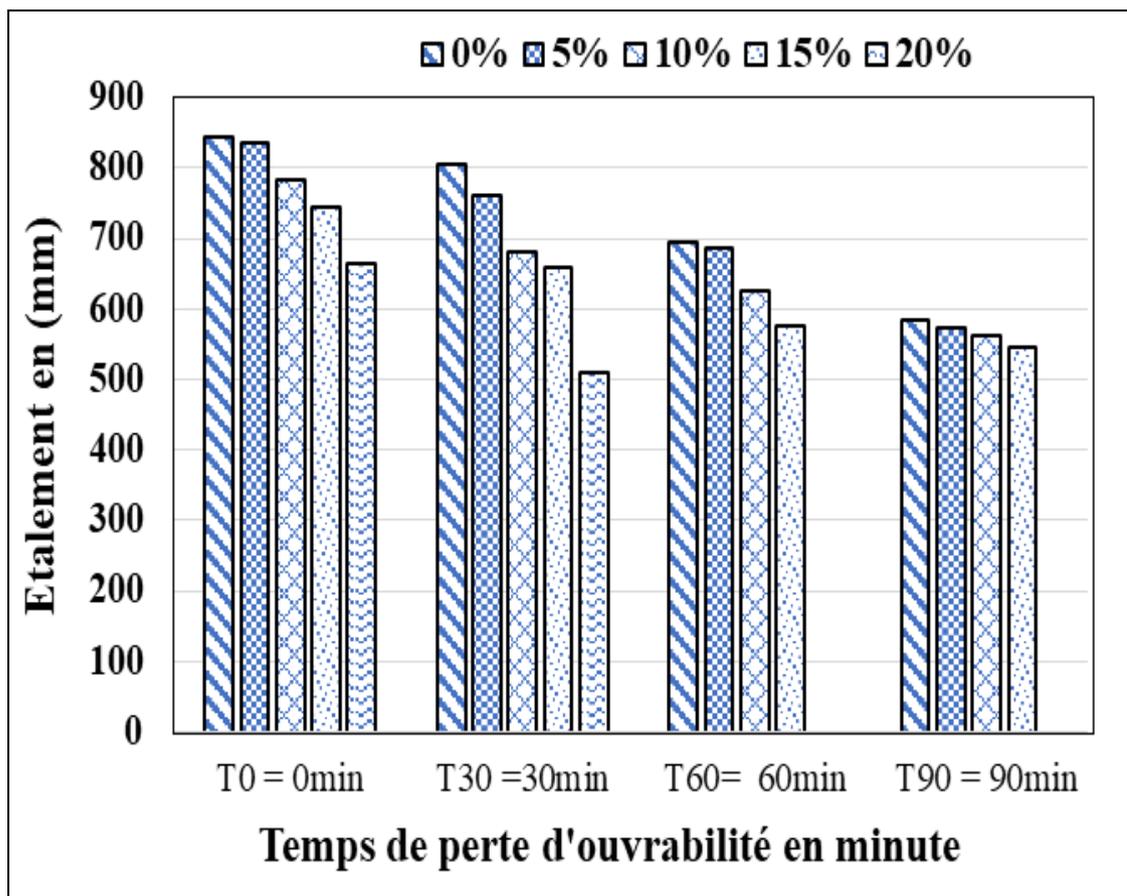


Figure 4.6 : Corrélation entre le temps d'écoulement Tv-Funnel et T500.

4.4 Effet des fines calcaires sur la rhéologie des BAP

4.4.1 Relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement

La figure 4.7 montre la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement de tous les mélanges de BAP contenant différents teneurs en fines calcaires comme substituant du sable concassé. Cette figure présente une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement après avoir franchir le seuil de cisaillement [249]. La loi de comportement des mélanges est obtenue selon l'équation linéaire 4.1.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (4.1)$$

Où :

τ (Pa) : Contrainte de cisaillement

τ_0 (Pa) : Seuil de cisaillement ;

μ (Pa.s) : Viscosité plastique ;

$\dot{\gamma} \left(\frac{1}{s} \right)$: Taux de cisaillement.

Les résultats indiquent que tous les mélanges de BAP présentent un comportement viscoplastique de Binghamien conformément à différentes investigations [249].

Les chercheurs [121] ont admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps.

À partir de ces courbes d'écoulement, les propriétés rhéologiques de chaque type de mélange de BAP dans lesquelles la contrainte de cisaillement, τ (Pa) est le point d'intersection des courbes descendantes avec l'axe des ordonnées (y) et la viscosité plastique du mélange est la tangente des courbes ont été déterminées.

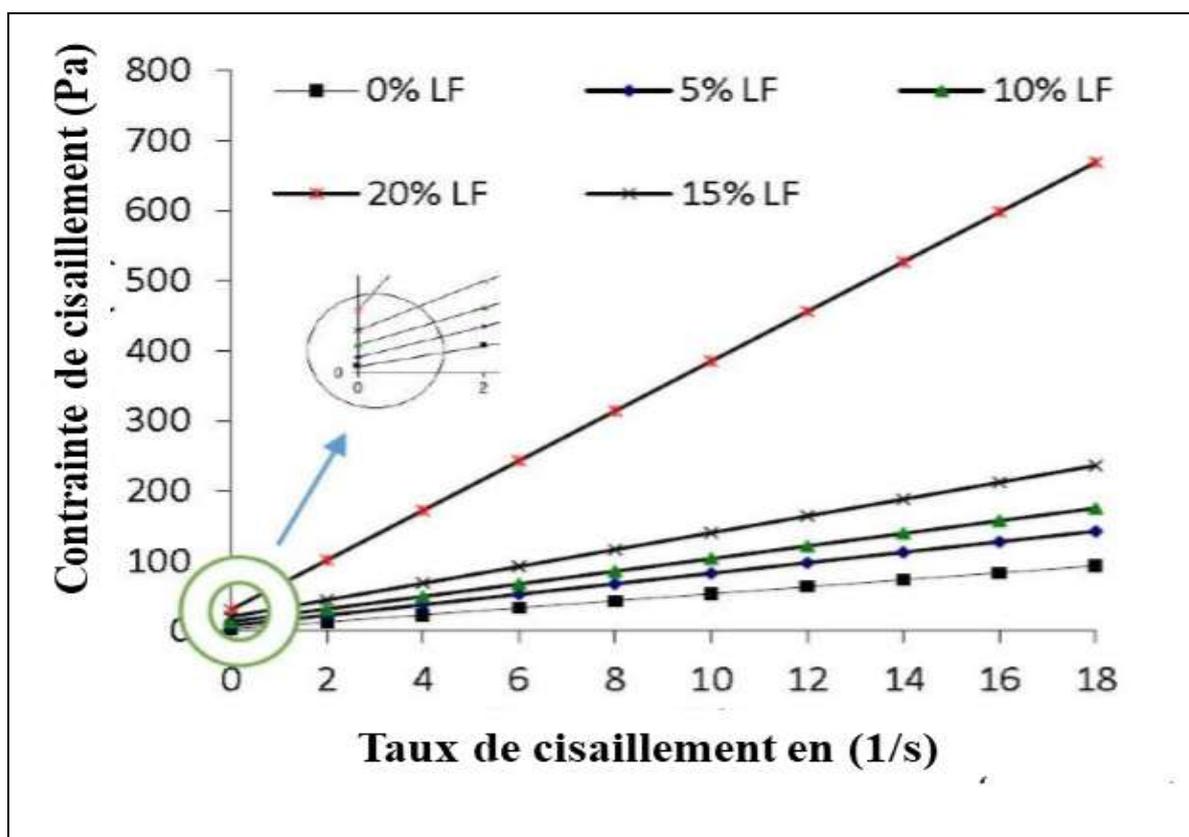


Figure 4.7 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

4.4.2 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement (τ_0) est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). De Larrard et al. [250] ont considéré que le seuil de cisaillement est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines. Dans notre étude, la relation entre la contrainte de cisaillement et l'étalement du BAP en fonction de la teneur de fines calcaires est présentée à la figure 4.8.

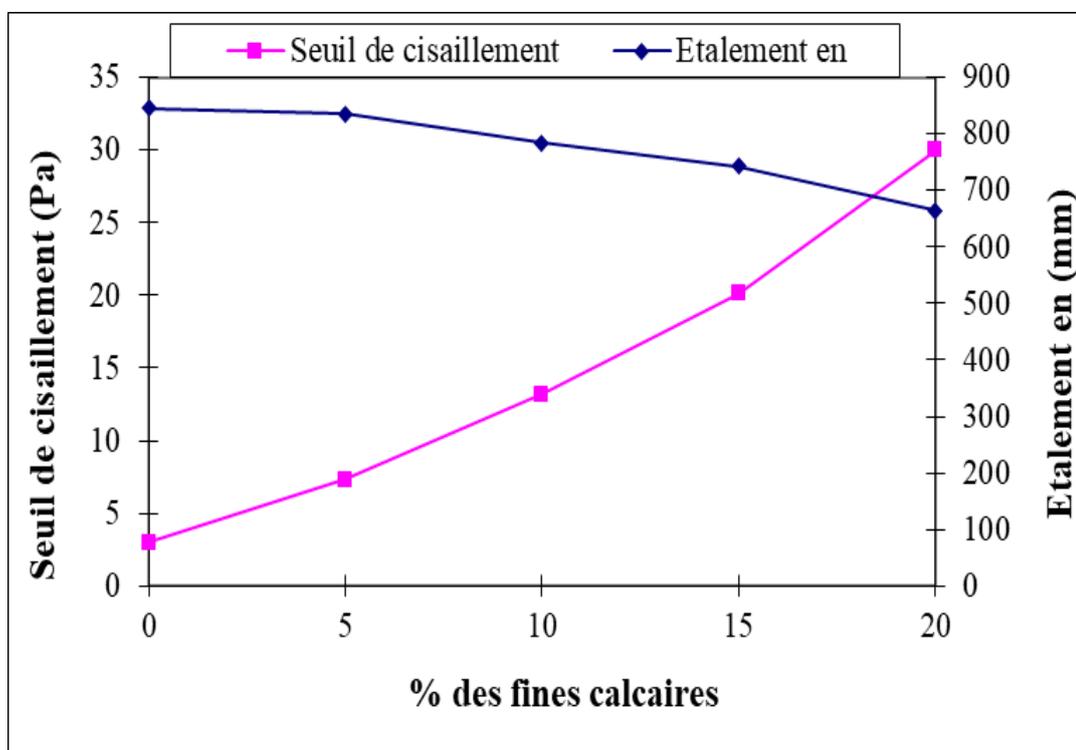


Figure 4.8 : Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement en fonction des fines calcaires.

Cette figure montre une relation inverse entre l'étalement et la limite d'élasticité. Le remplacement partiel de fines calcaires dans le sable concassé de 0% à 20% diminue l'étalement de 845 mm à 665 mm et augmente le seuil de cisaillement de 3 Pa à 30,5 Pa. Cette augmentation peut être expliquée par la grande finesse des fines calcaires qui favorise une augmentation de la demande en eau. Cela permet aussi un développement du frottement intergranulaire entre les particules, et, par conséquent, l'augmentation du

seuil de cisaillement des mélanges de BAP. Ces résultats ont été confirmés par d'autres chercheurs [114, 115].

4.4.3 Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement

Plusieurs chercheurs s'accordent sur la nécessité de recourir au moins à deux essais empiriques différents pour établir des relations entre les grandeurs spécifiques et les caractéristiques rhéologiques des bétons telles que la corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement [115].

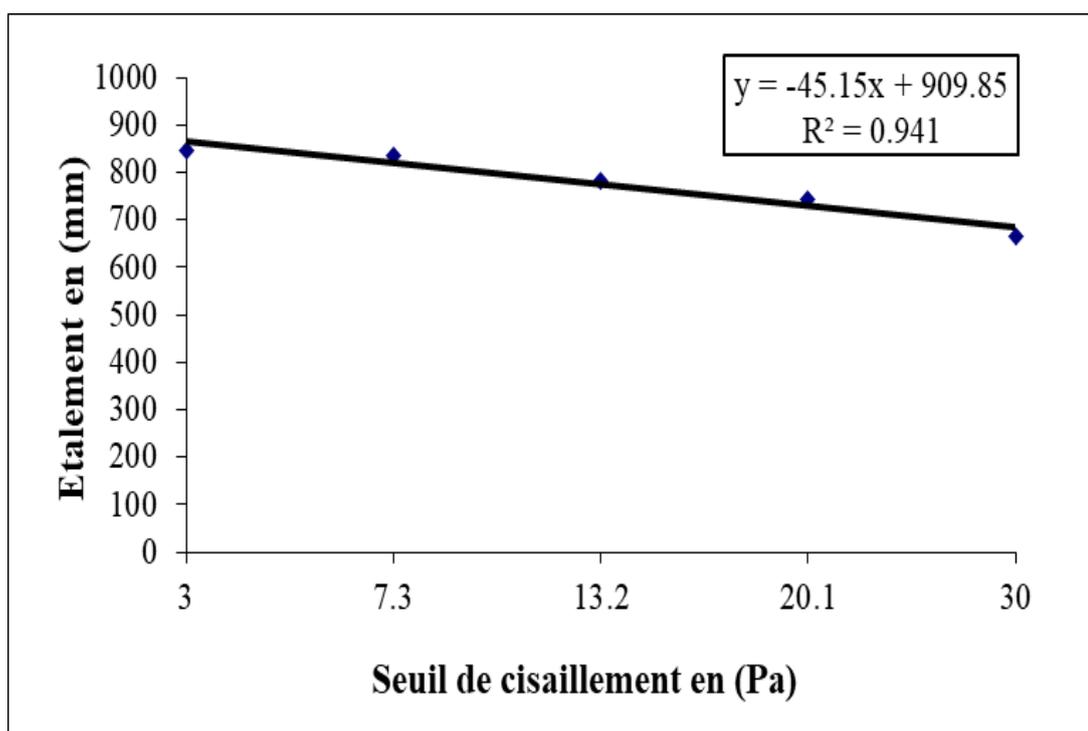


Figure 4.9 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement.

Les résultats présentés sur la figure 4.9 montrent une relation linéaire entre l'étalement et le seuil de cisaillement. On remarque qu'il y a une diminution de l'étalement mesuré avec l'augmentation du seuil de cisaillement des mélanges de BAP avec et sans fines calcaires. Le coefficient de régression ($R^2 = 0,94$) élevé pour pouvoir prédire le seuil de cisaillement en fonction de l'étalement du BAP.

4.4.4 Viscosité plastique

La viscosité du béton constitue un critère important pour caractériser le comportement du BAP. Elle peut être déduite à partir de la mesure des frottements internes d'un matériau sous l'effet de sollicitations imposées (contraintes de cisaillement). La

viscosité (μ) est d'autant plus faible que ces forces de frottement internes sont petites. Le béton s'écoule et s'étale d'autant plus rapidement que la viscosité est faible.

La figure 4.10 présente la relation entre la viscosité plastique (μ) et le temps d'écoulement (Tv-funnel).

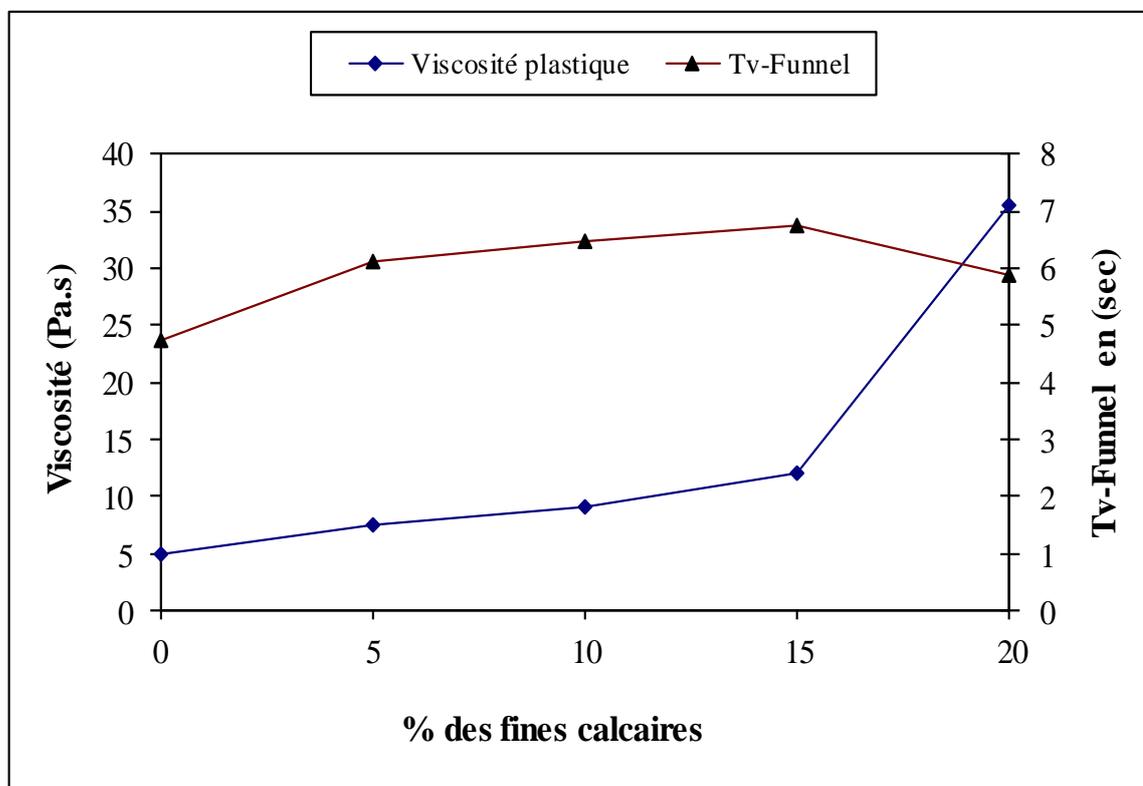


Figure 4.10 : Variation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement Tv-Funnel.

La viscosité plastique augmente avec l'augmentation de la teneur en fines calcaires jusqu'à 15%. Une augmentation lente de la viscosité plastique a été observée entre 5 Pa.s et 12 Pa.s pour une teneur en FC comprise entre 0% et 15% ; par contre, pour 20% de fines calcaires, l'augmentation est significative (35,5 Pa.s).

Cette figure montre, également, que l'augmentation du taux de fines calcaires de 0 à 15%, par rapport au sable de concassage provoque une augmentation du temps d'écoulement de l'entonnoir en V de 4,72 s à 6,75 s et, également, de la viscosité plastique de 5 Pa.s à 12 Pa.s.

Une variation de 15% à 20% de fines calcaires entraîne une augmentation de la viscosité plastique à 35,5 Pa.s et une diminution du temps d'écoulement de l'entonnoir en V à 5,87 s.

4.4.5 Corrélation entre le temps d'écoulement Tv-funnel et la viscosité plastique

Il est maintenant admis que la viscosité est corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-funnel (Tv-funnel), alors que le seuil de cisaillement dépend de l'étalement et du temps de passage, au diamètre de 500 mm, de la galette d'étalement au cône d'Abrams T500. De Larrard et al. [250], Grunewals et al. [114] ont également conclu qu'il y a une bonne corrélation entre la viscosité plastique et Tv-funnel, avec un coefficient de corrélation élevé. On peut affirmer que les mêmes relations entre les paramètres empiriques et rhéologiques peuvent être utilisées pour les bétons autoplaçants à base de sable de concassage. La figure 4.11 présente une relation exponentielle entre le temps d'écoulement Tv-funnel et la viscosité plastique avec une bonne corrélation ($R^2 = 0,97$).

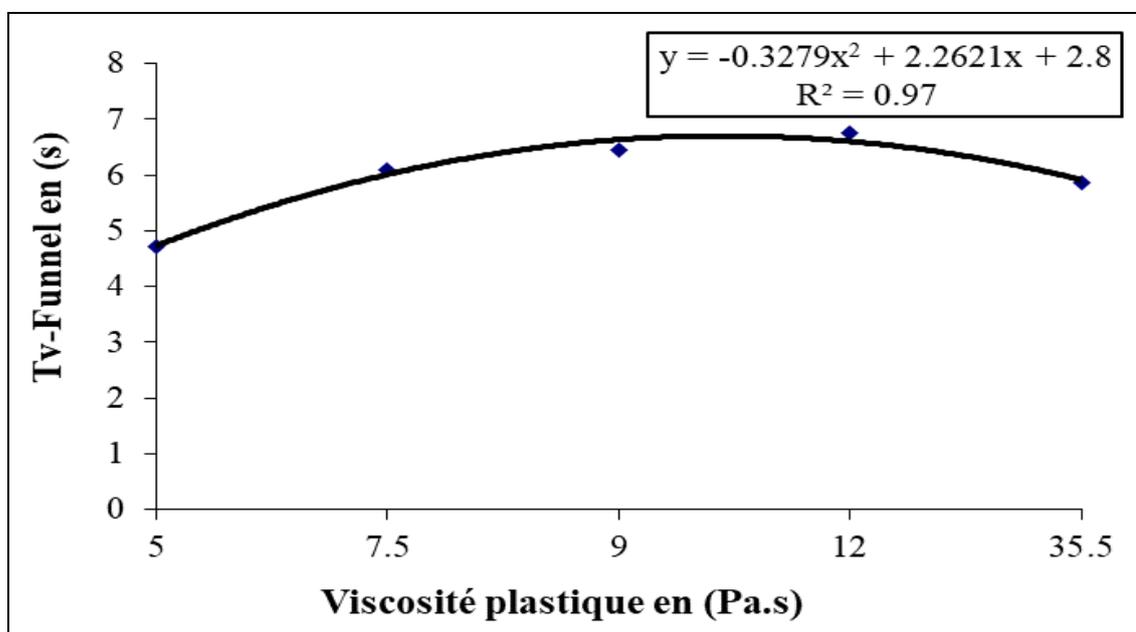


Figure 4.11 : Corrélation entre temps d'écoulement et viscosité plastique du BAP.

4.5. Effet des fines calcaires sur le béton auto plaçant à l'état durci

4.5.1 Effet des fines calcaires sur la résistance à la compression des BAP

Plusieurs chercheurs ont étudié l'influence des fines calcaires présentes dans le sable de concassage sur la résistance à la compression des mortiers [47,25]. Les résultats ont montré que la résistance à la compression augmente au jeune âge pour 10 à 15% de fines calcaires selon les différents types de ciment. Cette augmentation de la résistance à la compression au jeune âge est due à l'effet du filler, à l'accélération de l'hydratation de C3A et C3S, au changement de la morphologie du gel C-S-H et à la formation des

carboaluminates de la réaction du CaCO_3 avec le C3A. Cependant, la diminution de la résistance à la compression des mortiers avec fines calcaires pour les différents types de ciment est due à l'effet de dilution à long terme.

La figure 4.12 montre les résultats de la résistance à la compression des mélanges de BAP avec et sans teneur en fines calcaires aux différents âges. La résistance à la compression des mélanges de BAP varie de 65 à 72 MPa à 28 jours.

Les mélanges avec fines calcaires présentent une résistance à la compression, à 28 jours, inférieure à celle du béton témoin. Cependant, une augmentation de la résistance à la compression est observée pour les mélanges de BAP avec fines calcaires aux âges de 3 et 7 jours par rapport au mélange témoin.

Cette augmentation peut être attribuée, d'une part, à l'augmentation de l'hydratation des grains de ciment due aux sites de nucléation créés par les fines calcaires et, d'autre part, à l'effet de fillers. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par d'autres travaux [159, 192, 251].

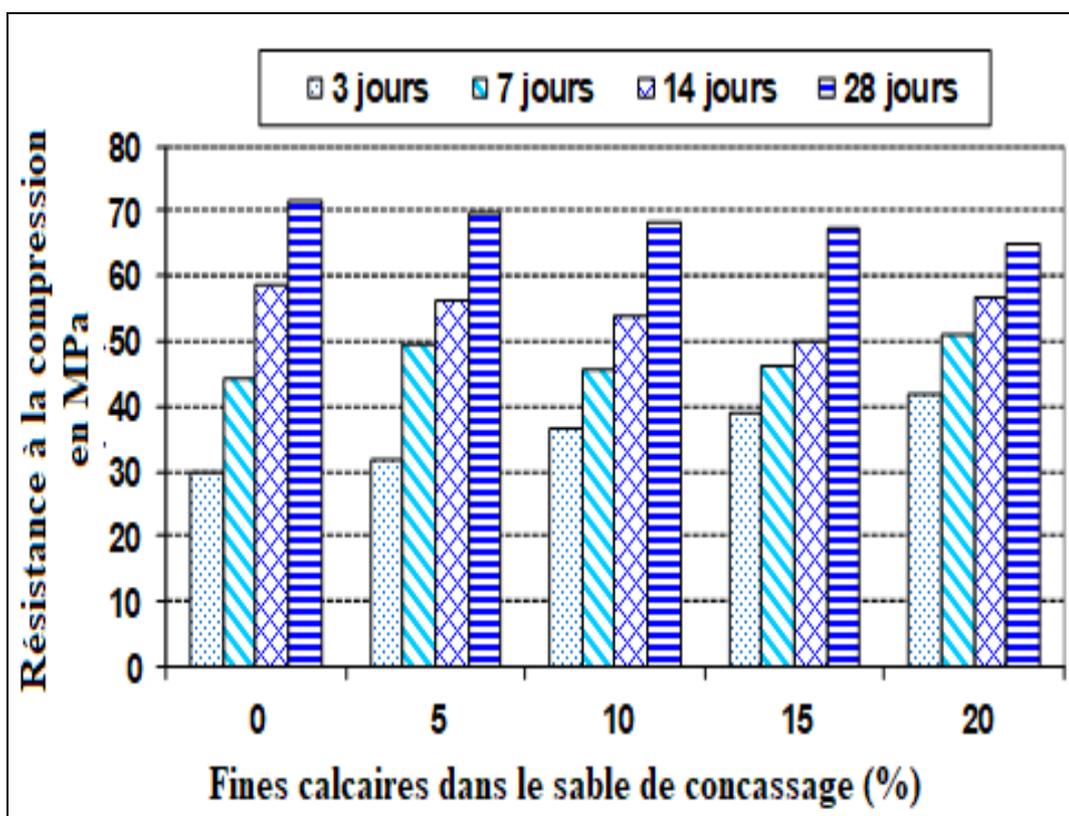


Figure 4.12 : Relation entre la résistance à la compression et la teneur en FC.

Des études [136, 137] [254] montrent que l'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de la résistance mécanique aux jeunes âges. Lorsque les

particules fines du filler sont bien défloculées par les superplastifiants, ils favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une incidence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. D'autres recherches ont montré [135,152] que l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires ainsi qu'à celle des bétons vibrés concordent les résultats précédents. En outre, Petersson et al. [140] ont affirmé que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est élevée. Cet effet tend lui-aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

4.5.2. Effet des fines calcaires sur la résistance à la traction par flexion des BAP

Les résultats de la résistance à la traction par flexion trois points à l'âge de 3, 7, 14 et 28 jours de tous les mélanges de BAP sont présentés sur la figure 4.13.

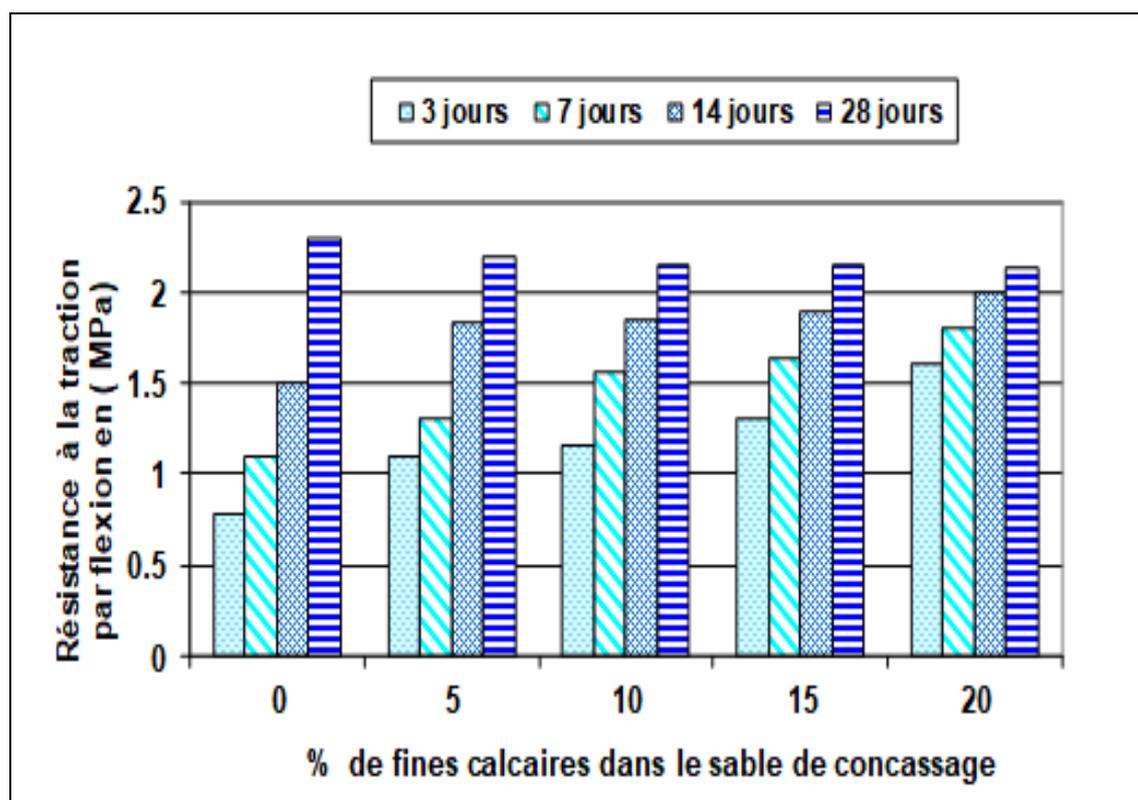


Figure 4.13 : Variation de la résistance à la traction par flexion du BAP en fonction du taux de fines calcaires dans le sable de concassage.

La substitution du sable concassé par les fines calcaires réduit généralement la résistance à la flexion de tous les mélanges à l'âge de 28 jours. Cependant, et de manière similaire à la résistance à la compression, la résistance à la traction aux jeunes âges (3 et 7 jours) augmente. Des résultats similaires ont également été rapportés par d'autres chercheurs dans le cas de bétons et de mortiers vibrés [25,159]. D'après Hebbouche [165], le développement de la résistance à la traction par flexion en fonction de la substitution des fines dans le sable de concassage est similaire à celui de la résistance à la compression.

Des travaux de recherches [251] ont montré que la résistance à la traction des mortiers et des bétons diminue avec l'augmentation du pourcentage de fines. Une chute remarquable de la résistance est observée pour les mortiers avec fines calcaires. Cependant, des résistances comparables sont notées pour les bétons à base de fines par rapport au béton de référence.

4.5.3 Effet des fines calcaires sur l'absorption capillaire des BAP

Le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert est non seulement lié à la structure poreuse du béton mais aussi à son humidité relative. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la remontée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison des deux phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton.

La figure 4.14 montre l'absorption d'eau par capillarité dans tous les mélanges de BAP étudiés dans la présente étude. L'absorption d'eau dans différents mélanges est facilement différenciée après une heure de test environ. L'augmentation de la teneur en fines calcaires dans le sable concassé diminue l'absorption d'eau par capillarité dans les mélanges de bétons autoplaçants. Le BAP de référence (0%FC), qui correspond au béton qui comprend des pores larges, présente un coefficient d'absorption d'eau capillaire supérieur à $5,89 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$ par rapport aux mélanges de BAP riches en fillers calcaires. L'augmentation de la teneur en FC de 0% à 20% diminue le coefficient d'absorption capillaire de $5,89 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$ à $4,75 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$, respectivement.

Le plus faible le coefficient d'absorption d'eau est donné par les mélanges de BAP contenant 20% de FC. Cette diminution pourrait s'expliquer par le remplissage des pores par les fines calcaires entraînant une diminution de la porosité de la pâte des mélanges et, par conséquent, une diminution de l'absorption capillaire. Donc, on peut signaler que l'incorporation de fillers calcaires issus de sable de concassage, comme substituant du sable lui-même, conduit à une densification de la matrice cimentaire. Les grains de fillers calcaires s'intercalent dans les pores créés par l'hydratation du ciment entre les granulats et les produits d'hydratation. Cela diminue légèrement l'absorptivité des BAP avec le développement de l'hydratation du ciment.

Les chercheurs ont trouvé que l'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion. [135]

Cependant, ZHU W et al [185] ont démontré que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires.

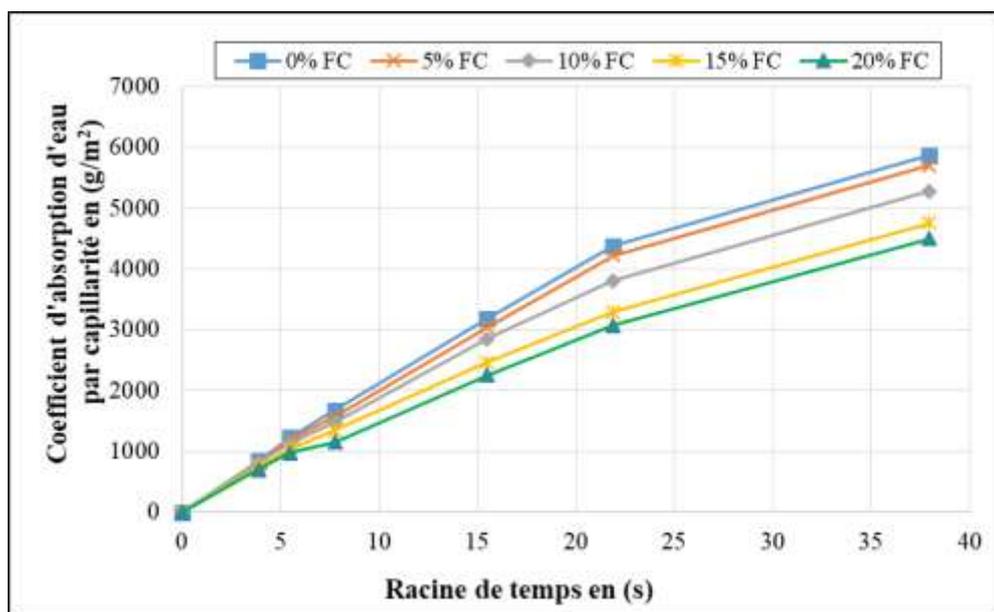


Figure 4.14 : Absorption d'eau par capillarité des différents mélanges de BAP.

4.5.4 Effet des fines calcaires sur la porosité accessible des BAP

La connaissance de la structure poreuse et, notamment, de la porosité ouverte d'un béton est tout à fait pertinente pour traduire la résistance d'un matériau cimentaire à la diffusion des ions de chlorure. En outre, la porosité pilote partiellement d'autres indicateurs et joue un rôle efficace si l'on veut caractériser la durabilité. La porosité

accessible à l'eau reste la méthode la plus préconisée par nombre de chercheurs [235]. Il ressort que l'accessibilité dépend prioritairement de la porosité du matériau. Les essais de mesure ont été effectués sur la moyenne de 3 échantillons de chaque type de BAP selon la norme NF P 18-459 [234].

Les résultats des essais expérimentaux de la porosité totale à 180 jours des mélanges de BAP, avec et sans FC, sont présentés sur la figure 4.15. On constate que l'augmentation de la teneur en FC dans le sable de concassage contribue à la diminution de la porosité totale des mélanges de BAP. Il a été observé également que le mélange de BAP contenant 20% de FC donne une valeur de porosité de 13,4% inférieure à la valeur de la porosité du BAP de référence lequel enregistre une porosité de 15,20%. Ce comportement peut s'expliquer par l'influence positive des fines calcaires sur la compacité des mélanges de bétons autoplaçants.

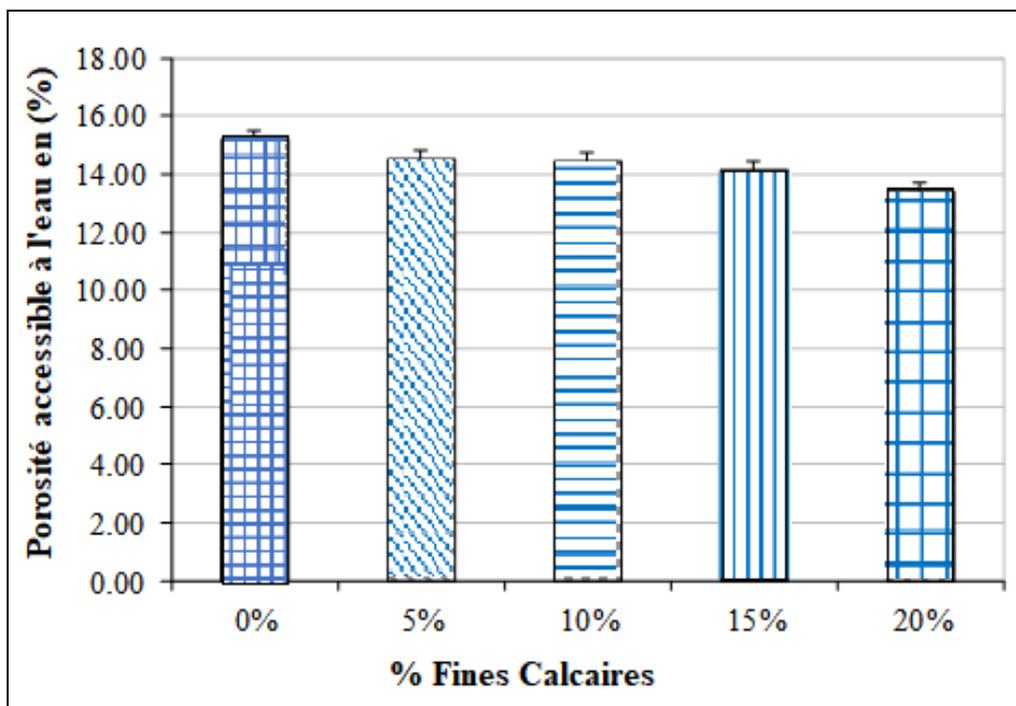


Figure 4.15 : Porosité accessible à l'eau en fonction du taux de fines calcaires.

4.5.5 Effet des fines calcaires sur la diffusion des ions de chlorures des BAP

La durabilité des ouvrages en béton armé est liée à la pénétration d'agents agressifs tels que les ions de chlorure qui contribuent à la corrosion des armatures. Les ions de chlorure pénètrent dans le béton selon des processus qui font intervenir la diffusion. Le phénomène de diffusion est étudié par le biais d'une expérimentation qui tient compte d'un ion principal dans la solution interstitielle (Cl^-), à partir d'un essai de migration

sous un champ électrique en régime stationnaire. Le transport de cet ion est décrit par l'équation de Nernst-Planck [236] à l'échelle macroscopique avec des paramètres calculés à la même échelle.

Les types de bétons autoplaçants à base de matériaux locaux ont été soumis à l'étude de la diffusion au niveau du laboratoire de génie civil et génie mécanique (LGCGM) au niveau de l'Institut Nationale des Sciences Appliquées (INSA) de Rennes, France.

L'essai de migration en milieu saturé sous champ électrique permet d'évaluer la diffusivité D_{mig} des chlorures dans le béton. Le coefficient de diffusion est calculé dans la zone où la concentration en chlorures du compartiment aval augmente linéairement en fonction du temps (régime permanent). Ceci permet d'éliminer, en outre, l'influence sur le coefficient de diffusion des interactions des chlorures avec la matrice cimentaire.

Les résultats du coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure de tous les mélanges de BAP à l'âge de 180 jours sont présentés sur la figure 4.16. Les valeurs du coefficient de migration des ions de chlorure sont comprises entre $(3.16 \text{ et } 6.26) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. La valeur la plus petite est donnée par le mélange de BAP avec une teneur en fines calcaires de 20%. L'effet positif de l'incorporation de FC dans le mélange entraîne une réduction du coefficient de migration des ions de chlorure pouvant atteindre 49,5% pour des teneurs élevées en FC.

La réduction du coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure est principalement due à la compacité des mélanges avec FC où les vides sont remplis. Des résultats similaires sont rapportés pour le béton vibré contenant des fines de calcaire issues de sable de concassage [25].

Les valeurs du coefficient de diffusion apparent des ions de chlorure entre 2 et 8 m^2/s indiquent une bonne résistance à la migration des ions de chlorures. Selon les résultats de ces essais expérimentaux, tous les mélanges de BAP avec et sans fines calcaires présentaient une bonne résistance à la pénétration des ions de chlorure.

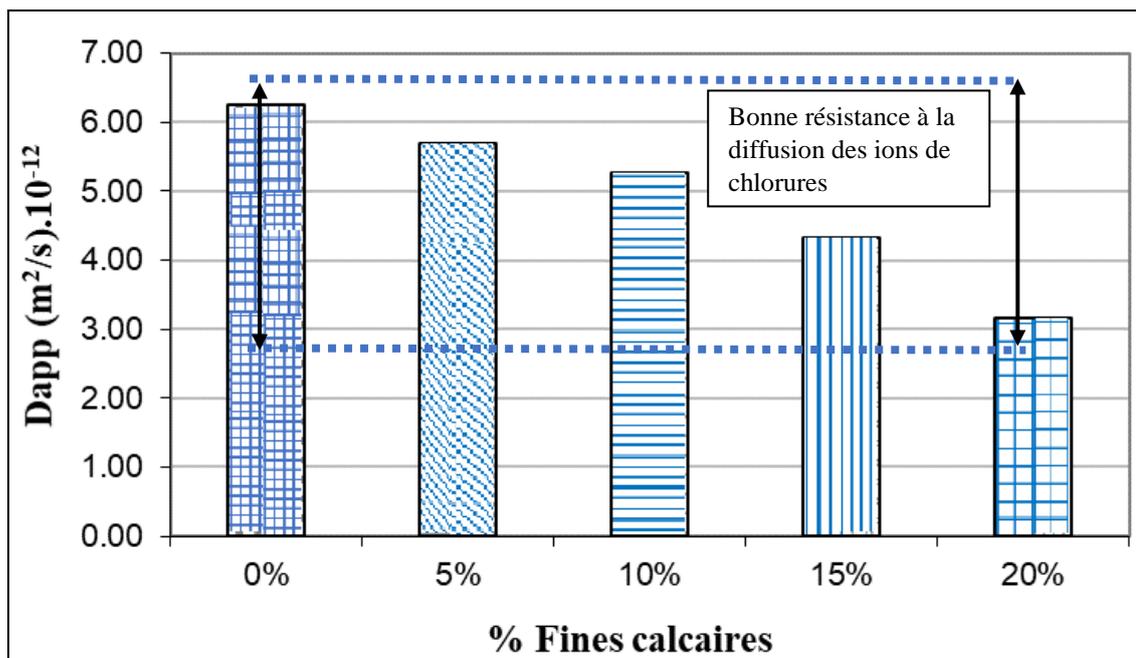


Figure 4.16 : Coefficient de diffusion des ions de chlorure en fonction du taux de fines calcaires.

4.5.6 Corrélation entre la résistance à la compression et le coefficient de diffusion du BAP

La figure 4.17 illustre la relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le coefficient de diffusion des ions de chlorure des différents mélanges de BAP.

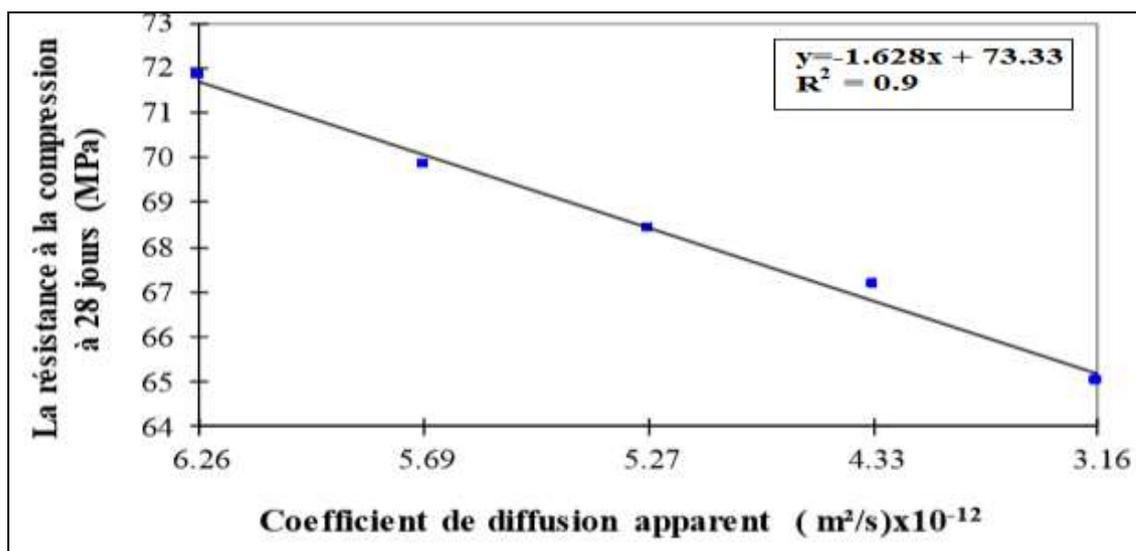


Figure 4.17 : Corrélation entre la résistance à la compression et la diffusion des ions de chlorure.

On peut donc retenir une relation linéaire reliant la résistance à la compression et le coefficient de diffusion des ions de chlorure. Le coefficient de corrélation déterminé est de l'ordre de 0,92.

4.6 Conclusion

A partir des essais effectués, et selon les normes NF EN 12350 et les recommandations d'AFGC, avec un étalement supérieur à 600 mm, un gradient de remplissage (H_2/H_1) supérieur à 0,80, un taux de ségrégation inférieur à 15%, un temps d'étalement T500 inférieur à 5 s et un temps d'écoulement en V-funnel inférieur à 14 s, les caractéristiques rhéologiques obtenues montrent que tous les mélanges de BAP étudiés satisfont aux conditions requises et peuvent être qualifiés de béton autoplaçant.

La caractérisation de la capacité à s'écouler des bétons à l'état frais afin de prédire la mise en œuvre du matériau sur chantier ou en usine de préfabrication a fait l'objet de nombreuses études durant la dernière décennie. En effet, lorsque la contrainte de cisaillement devient égale ou inférieure à la valeur du seuil du matériau, le béton s'arrête de s'écouler dans le coffrage. Par conséquent, pour prédire la capacité du matériau à s'écouler dans une géométrie connue telle que celle des dalles ou de poutres, il est nécessaire d'être capable de prédire ce phénomène en fonction de paramètres d'entrée comme le seuil d'écoulement et la viscosité plastique.

Il a été observé que les fines calcaires issues de sable de concassage influent sur la résistance à la compression et sur la résistance à la traction du BAP, dont l'augmentation du taux de fines calcaires peut accroître les résistances mécaniques du BAP à court terme et influent négativement à long terme.

Concernant la durabilité, nous avons constaté que les fillers calcaires contribuent à la diminution de l'absorption capillaire, de la porosité accessible à l'eau et du coefficient de diffusion des ions de chlorure des bétons autoplaçants à base de sable de concassage.

Conclusion générale

Notre travail expérimental a été élaboré pour comprendre l'effet des fines calcaires issues de sable de concassage sur les performances des bétons autoplaçants à l'état frais (ouvrabilité et rhéologie) et à l'état durci (résistances mécaniques et la durabilité. Les taux de substitution du sable de concassage par les fines calcaires sont : 0%, 5%, 10%, 15% et 20%. Les résultats obtenus lors de cette étude, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ L'augmentation du taux de fines calcaires de 0 à 20% dans le sable de concassage contribue à la diminution de l'étalement du béton autoplaçant ;
- ❖ Le temps de passage Tv-Funnel est augmenté par l'augmentation des fines calcaires dans le BAP ;
- ❖ Le temps d'écoulement T500 des BAP est augmenté avec l'augmentation du taux de fines calcaires dans le sable de concassage ;
- ❖ La résistance à la ségrégation des BAP diminue avec l'augmentation de la teneur en fines ;
- ❖ L'augmentation de la teneur en fines calcaires dans le sable de concassage de 0 à 10% entraîne une augmentation du rapport (H2/H1) de 0,96 à 0,97 par rapport au BAP0 de référence. La valeur la plus élevée de (H2 / H1) est remarquée pour un BAP avec 5% de fines calcaires ;
- ❖ L'augmentation du temps d'écoulement du V-funnel entraîne donc l'augmentation de T500, ce qui donne une relation proportionnelle entre ces deux paramètres ;
- ❖ Tous les mélanges de BAP testés ont atteint un étalement et une capacité de passage et de remplissage adéquats ;
- ❖ L'essai de perte d'ouvrabilité des mélanges de BAP montre que le mélange de 20% de fines calcaires n'est plus considéré comme un BAP car il a perdu son ouvrabilité au bout de 60 minutes. Cependant, les autres mélanges sont restés ouvrables jusqu'à 90 minutes après malaxage ;

- ❖ Les résultats de la rhéologie indiquent que tous les mélanges de BAP présentent un comportement viscoplastique de Bingham ;
- ❖ Le remplacement partiel de fines calcaires dans le sable concassé de 0% à 20% augmente le seuil de cisaillement ;
- ❖ L'augmentation du seuil de cisaillement provoque une diminution de l'étalement des mélanges de BAP avec et sans fines calcaires ;
- ❖ La viscosité plastique augmente avec l'augmentation de la teneur en fines calcaires jusqu'à 15% ;
- ❖ Les fines calcaires présentes dans le sable de concassage contribuent à l'augmentation de la résistance à la compression et de celle à la traction à court terme et à leur diminution à long terme, et ce, grâce à la bonne distribution granulaire du BAP.
- ❖ L'augmentation de la teneur en fines calcaires diminue l'absorption d'eau par capillarité des mélanges de BAP , quant au mélange de référence (BAP0%FC) qui correspond au béton qui comporte de larges pores, il présente un coefficient d'absorption d'eau capillaire supérieur à $5,89 \times 10^3$ g/cm² par rapport aux mélanges de BAP riche en fillers calcaires ;
- ❖ L'augmentation de la teneur en FC dans le sable de concassage contribue à la réduction de la porosité totale des mélanges de BAP ;
- ❖ L'effet positif de l'incorporation de FC dans le mélange de BAP entraîne une réduction du coefficient de migration des ions de chlorure pouvant atteindre 49,5% pour les teneurs élevées en FC.

Recommandations et perspectives

L'étude de l'effet du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité du BAP reste limitée dans cette thèse. Par conséquent, nous recommandons pour de futurs travaux ce qui suit :

- ❖ Mettre en évidence les relations entre les propriétés rhéologiques des BAP et le pourcentage de fines calcaires dans le sable de concassage ;
- ❖ Etude comparative entre différents types de sable de concassage ;
- ❖ L'effet des ajouts combinés (laitier, pouzzolane, cendres volantes) sur les propriétés des BAP à base des sable de concassage à l'état frais et durci ;
- ❖ Compléter par d'autres essais à savoir, le module de Young, le retrait, le fluage, les essais de durabilité (perméabilité au gaz, carbonatation), et le comportement du BAP en milieu agressif (eau de mer) ;
- ❖ Eclaircir d'autres aspects à caractère structural, dont la caractérisation de la propagation des fissures des BAP et, également, des essais d'arrachement pour caractériser l'adhérence entre le BAP et l'acier.

Cela facilitera la compréhension du comportement de ce sous-produit et son utilisation convenable dans la construction.

REÉFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Okamura H and Ozawa K. (1994). Self-Compactable High Performance Concrete in Japan. International Workshop on High performance Concrete. Bangkok.
- [2] Okamura H and Ozawa K. (1995). Mix design for Self-Compacting Concrete. Concrete Library of JSCE.
- [3] Okamura H., Ouchi M. (1999). Self-compacting concrete, development, present use and future. RILEM Symposium Stockholm, pp 3 – 14.
- [4] AFGC. (2008).Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants. Document scientifique et technique.
- [5] Billberg P. (2003).Form pressure generated by self-compacting concrete. Proceedings of the third international RILEM conference on SCC. Iceland, pp 271 – 280.
- [6] Leemann A., Hoffman C. (2003). Pressure of self-compacting concrete on the formwork. Proceedings of the third international RILEM conference on SCC. Iceland. pp 288 – 295.
- [7] Ovarlez G., Roussel N. (2006). A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork. Materials and Structures, pp. 269 – 279.
- [8] Walraven J. (2003). Structural aspect of self-compacting concrete. Proceedings of the third International RILEM conference on SCC. Iceland, pp. 15 – 22.
- [9] Assaad J. and Khayat K.H. (2005).Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal, pp. 145-153.
- [10] Bombléd J.P. (1973).Rhéologie des mortiers et des bétons frais; influence du facteur ciment. Proceeding of RILEM. Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, p.1-169.
- [11] Newman J. and Choo. (2003).Advanced concrete technology-Constituent materials. Butterworth-Heinemann. ISBN 0750651032.
- [12] Locher F.W. (1976). Die festgeit des zements, Beton. pp. 247–249.
- [13] Adam M. Neville. (1992). Propriétés des bétons. Eyrolles.p. 805.
- [14] Kim M.H., Koh Y., Kamata E., Kim G.Y. (1997). An experimental study on the fluidity and evaluation of high fluidity concrete according to the kinds of fine aggregate. Proceedings of the Japan Concrete Institute. Vol. 19, No. 1, pp. 67 – 72.
- [15] Hirata T., Takeda N., Miura N., Sogo S. (1995). The influence of the aggregate grading on fresh highly workable concrete. Proceedings of the Japan Concrete Institute.Vol 17, No. 1, pp. 81 – 86.
- [16] Sudo F., Masuda Y., Gomi S. (1996).The influence of fine aggregate grading on workability of high-fluidity concrete.Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 18, No. 1, pp. 123 – 128.
- [17] Edamatsu Y., Yasumoto A., Mizukoshi M., NagaoKa S. (1997). Influence of sand or gravel volume on self-compactability of fresh concrete. Proceedings of the Japan Concrete Institute. Vol. 19, No. 1, pp. 49 – 54.
- [18] Chai H.(1998).Design and testing of self-compacting concrete, PhD thesis, University College of London (UCL), p. 259.
- [19] Naoki N., Ozawa K. (1996). Effect of fine aggregate on the filling ability of fresh concrete. Proceedings of JSCE. Vol. 18, No. 1,pp. 105 – 109.

- [20] Bartos P.J.M. (2005). Testing-SCC: towards new European standards for fresh SCC. SCC'2005 – China, 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self Consolidating Concrete. Yu Z.S.C., Khayat K.H., Xie Y., RILEM Publication SARL. Paris, pp. 25 – 44.
- [21] Billberg P. (1999). Fine mortar rheology in mix design of SCC. Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. Å. Skarendahl and Ö. Petersson. Stockholm, Sweden, pp. 47 – 58.
- [22] Emborg M. (2000). Final report of task 8.1 Mixing and transport. Brite EuRam Contract No. BRPR-CT96-0366. Betongindustri AB, p. 65.
- [23] Felekoglu B. (2008). A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, pp. 646-654.
- [24] Benabed B., Kenai S., Azzouz L., Kadri E., Belaidi A.S.E.(2012). Effects of limestone quarry dust content on rheology and strength of self-compacting mortar. Eds. Holland T.C., Gupta P.R., Malhotra V.M. Proceedings of Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. ACI, Prague, Czech republic, pp. 377 – 388
- [25] Menadi B., Kenai S., Khatib J., Ait-Mokhtar A. (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. *Construction and Building Materials*, pp. 625 – 633.
- [26] Shobha M., Mohan D.H., Raju P.S.N.(2006). Aggregate size and behavior of SCC. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Construction Materials*, 159, Issue CM4, pp. 147 – 152.
- [27] Harini M., Shaalini G., Dhinakaran G. (2012). Effect of size and type of fine aggregates on flowability of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16, pp. 163 – 168.
- [28] Bouziani T., Bederina M., Hadjoudja M. (2012). Effect of dune sand on the properties of flowing sand concrete (FSC). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6, pp. 59 – 64.
- [29] Domone P.L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 197 – 208.
- [30] Okamura H., Ozawa K., Ouchi M. (2000). Self-compacting concrete, *Structural Concrete*, 1, pp. 3 – 17.
- [31] Yammine J. (2007). Rhéologie des bétons fluides à hautes performances: relations entre formulations, rhéologie, physico-chimie et propriétés mécaniques. Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Université Paris – 6, p. 198.
- [32] König G., Dehn F., Weise F. and Hertel C. (2001). Applications of ready-made binders for self-compacting concrete (SCC). Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan, 2001, pp. 361-367.
- [33] El-Ariss B. (2006). Effect of reducing coarse aggregates on concrete strength. *Construction and Building Materials*, vol 20, pp. 149–157.
- [34] FEBELCEM. (2005). Les bétons autoplaçants, Bruxelles. Fédération de l'Industrie Cimentière Belge.
- [35] Dreux G et Festa J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants. 8ème édition, Eyrolles.
- [36] NF-EN-1008. (2003). Eau de gâchage pour bétons - Spécifications échantillonnage, essais et évaluation de l'aptitude à l'emploi.

- [37] Neville A.M. (2000). Propriétés des bétons, Traduction de CRIB. Sherbrooke, Canada, Ed. Eyrolles, Paris, p. 806.
- [38] Park Noh Park. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 842 – 849.
- [39] Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R. (2001). Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 245 – 255
- [40] Lachemi, M. (2001). Self-Compacting Concrete Incorporating High-Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 413-420.
- [41] Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P. (2003). Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete. Proceedings of the third International RILEM Conference on SCC, Iceland, Proceedings PRO 33, pp. 143 – 153.
- [42] Zhu W., Gibbs J.C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1457 – 1462.
- [43] Khatib, J. M. (2008). Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1963-1971
- [44] Benezet J.C., Benhassaine A. (1999) Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders. *Powder Technology*, Volume 105, Number 1, pp. 167 – 171
- [45] Felekoglu B. (2008). A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, vol 22, pp. 646–654.
- [46] Shi T.Y., Tanigawa Y., Mori H., Kurokawa Y. (1998). A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 20, pp. 9 – 14.
- [47] Yahia, A., Khayat, K. H. (2003). Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture. *Materials and Structures*, 36(6), 402-412.
- [48] Dupain R., Lanchon R et Saint Arroman J.C. (1995). *Granulat, Sols, Ciments et Bétons*», caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 2ème édition conforme aux normes européennes, édition éducative, pp 235.
- [49] Krachai R.M., Bouabdallah M.A., Abdelhadi H., Mamou K. (2009). Influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les performances mécaniques des bétons autoplaçants, First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET, Oran, Algeria.
- [50] Rackel S.N. (2001). Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash. Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier.
- [51] Khatib J.M., Sabir B.B., Wild S. (1996). Some properties of metakaolin paste and mortar Concrete for environment enhancement and Protection. Ed. Dhir R.K. and Dyer T.D., Spon press, London.
- [52] HE C., Osbaeck B., Makovicky E. (1995). Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and concrete research*, Vol.25, 8, p1691-1702.
- [53] Gaboriau H. Gallias J.L. LE Berr E. P. (1996). Utilisation des poudres minérales naturelles ultrafines pour l'amélioration des performances des bétons. Congrès de la Société de l'industrie Minérales, Montpellier, France.

- [54] Sabir B., Wild S., Bai J. (2001). Métakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete. *Cement and concrete Research*, Vol.23, 6, p441-451.
- [55] Badogiannis E., Kakali G., Dimopoulou G., Chaniotakis E., Tsivilis S. (2005). Metakaolin as a main cement constituent, Exploitation of poor Greek kaolins. *Cement and Concrete Composite*, Vol.27, p197–203.
- [56] Brunetaud X. et Jausserand L. (2005). Travaux pratiques, Ciment et bétons. Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans.
- [57] Comparet C. (2004) Thèse de Doctorat en Chimie - Physique, Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment Portland et des superplastifiants du béton. Université de Bourgogne – UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot.
- [58] Bury, Christensen. (2002). The role of innovative chemical admixtures in producing selfconsolidating concrete. *Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete*, Chicago, pp 141-146.
- [59] Benaïcha. M. (2013). Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales: Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons. Thèse de doctorat en science et technique, Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté des Sciences et Techniques Tanger.
- [60] Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N. (1998). *Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete*, Ed. CANMET, Ottawa, Canada.
- [61] Flatt R., J., Houst Y. F. (2001). A simplified View on Chemical Effects perturbing the Action of Superplasticizers, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1169-1176.
- [62] Spiratos N., Pagé M., Mailvaganam N.P., Malhotra V.M., Jolicoeur C. (2003). *Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology, and Practice*, Ed. CANMET, Ottawa, Canada.
- [63] Khayat K.H. (1998). Use of viscosity –modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete. *ACI Material journal*, Vol 65 N°2.
- [64] Chopin D. (2003). Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants, optimisation du temps de fabrication. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.
- [65] Abib Z. (2006). Thèse de Magistère en Génie Civil, Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
- [66] Sedran T. (1995). Les bétons autonivelants- Synthèse bibliographique, *Bulletin de liaisons des laboratoires des ponts et chaussées*, N° 196, p53-60.
- [67] Petersson O., Billberg P. (1999). Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler. *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, pp. 333-344.
- [68] Bui V.K., Montgomery D. (1999). Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. *Proceedings of the first International RILM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Suède, pp. 373-384.
- [69] SU Nan., Kung.Chung HSU and His.Wen CHAI. (2001). A Simple mix Design Method for Self-Compacting Concrete. *Cement and Concrete Research* 31, pp 1799-1807.

- [70] Sedran T., de Larrard F. (1999). Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 321-332.
- [71] Ozawa K., Maekawa K., Okamura H. (1990). High performance concrete with high filling capacity. Proceedings of RILEM International Symposium on Admixtures for Concrete: Improvement of Properties, Barcelone, pp. 51.
- [72] Okamura H., Ozawa K. (1995). Mix design for self-compacting concrete. Concrete library of JSCE, N° 25, pp 107-120.
- [73] Okamura H. (1999). Self-compacting concrete, high performance Concrete. Social System Institute, Concrete. Int. 19 (7) 50-54, Tokyo (in Japanese).
- [74] Okamura H., Maekawa K., Ozawa K. (1999). High performance concrete. First ed. Gihouda Publishing Co, Tokyo.
- [75] Hayakawa M., Matsuoka Y. and Yokota K. (1995). Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan. Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397.
- [76] Okamura H., Ouchi M. (1998). Self-compacting high performance concrete. Progress in Structural Engineering and Materials 1, 14.
- [77] RILEM. (2001). Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France.
- [78] Bethmont S. (2005). Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP), Etude expérimentale des interactions granulaires. Thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées.
- [79] Jin. (2002). Properties of mortar for self-compacting concrete. PhD thesis de l'Université de Londres, 398 pages.
- [80] Sedran T. (1999). Rhéologie et rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants .Thèse de l'école des ponts et chaussées, 220 pages. OA 34.
- [81] Edamatsu Y., Nishida N., Ouchi M. (1999). A rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles. Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 309-320.
- [82] Petersson O., Billberg P., Van B.K. (1996). A model for self-compacting concrete", Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse.
- [83] Ozawa K., Tangtermsirikul S., Maekawa K. (1992). Role of Powder Materials on the Filling Capacity of Fresh Concrete. Proceedings of the 4th Canmet/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, pp. 121-130.
- [84] De Larrard F. (2000). Structures granulaires et formulation des bétons. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [85] De Larrard F. et al. (1994). Prévion de la compacité des mélanges granulaires le modèle de suspension solide n°1- fondements théoriques et calibration du modèle .Bulletin du laboratoire central des ponts et chaussées n° 194.

- [86] Sedran Thierry., François de Larrard et Daniel Angot. (1994). Prédiction de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -Réf. 3862.
- [87] AFGC. (2002). Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete. Association Française de Génie Civil.
- [88] Turcry P., Loukili A. (2002). Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants: incidence sur les caractéristiques rhéologiques. Forum des associations AFGC/AUGC/IREX: innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse.
- [89] Jin. (2002). Properties of mortar for self-compacting concrete. PhD thesis de l'Université de Londres, 398 pages.
- [90] Maher E. (2005). Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais. Thèse de doctorat, Université toulousaine III Paul Sabatier.
- [91] AFGC. (2008). Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants. AFGC.
- [92] Legrand C. (1982). La structure des suspensions de ciment, Chapitre 6 dans le béton hydraulique. Presses de l'ENPC, pp. 99 – 113
- [93] Noguchi T., Oh S.G., Tomosawa F. (1999). Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete. Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, pp. 59 – 70
- [94] NF EN 12350-8. Essai pour béton frais –partie 8: Béton autoplaçant-Essai d'étalement.
- [95] Sonebi M and Bartos P.J.M. (2002). Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete » Materials and Structures, Vol 35, pp. 462-469.
- [96] Domone P.L., Jin J. (1999). Properties of mortar for Self-Compacting Concrete. Proceedings of the first International Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings (PRO 7), Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, pp. 109 – 120.
- [97] EFNARC. (2002). Specifications and guidelines for self-compacting concrete.
- [98] Arbelaez J.C.A., Rigueira V. J.W., Marti V.J.R., Serna R.P, Pinto B.M. (2003). Reduced models test for the characterization of the rheologic properties of self-compacting concrete (SCC). Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 240-250.
- [99] Turcry P. (2004). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants Influence de la formulation, Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.
- [100] Bouhamou N. (2008). Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état frais et durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux Algérien. Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie.
- [101] Persoz B. Introduction à l'étude de la rhéologie, Paris, Dunod, 1960
- [102] Couarraze G. and Grossiord J.L. (1983). Initiation à la Rhéologie, Lavoisier, Paris
- [103] Beaupré D. (1994). Rheology of High Performance Shotcrete, Ph.D. Thesis, University of British Columbia.
- [104] Courrazé G., Grossiord J.L. (2000). Initiation à la rhéologie. Tec& Doc.

- [105] Wallevik, O. H. (2006). Rheology of Cementitious Materials. The Icelandic Building Research Institute.
- [106] Nguyen H.M. (1996). Comportement rhéologique des suspensions concentrées. Mémoire DEA, INSA Rennes. pp 82.
- [107] M'hamed A. (2015). Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton. Thèse de Doctorat, Université de Chlef, Algérie.
- [108] De larrard F., Belloc A. (1999). L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées – 219 – REF, 4246 – PP.41-52.
- [109] Liddell P.V., Boger D.V. (1996). Yield stress measurements with a vane" journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 63, 2-3, pp. 235-261.
- [110] Legrand C., (1971). Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [111] Ferraris C.F., de Larrard F. (1998). Testing and modeling of fresh concrete rheology. Maryland: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg.
- [112] Hu C. (1995). Rhéologie des bétons fluides. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des ponts et Chaussées: Paris. p. 201.
- [113] De Larrard F., Ferraris C., and Sedran T. (1998). Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, in Materials and Structures. Springer Netherlands. p. 494-498
- [114] Grünewald S., Walraven J.C. (2003). Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58.
- [115] Nielsson I., Wallewick O.H. (2003). Rheological evaluation of some empirical methods – preliminary results. Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68.
- [116] Geiker M.R., Brand., Thrane L.N., Bager D.H., Wallevik O. (2002). The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete. Cement and concrete research., 32, 11, pp. 1791-1795..
- [117] Banfill P.F.G. (2003). The rheology of fresh cement and concrete - a review", Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement. Cement's Contribution to the Development in the 21st Century, Durban, Afrique du Sud, pp. 50-63.
- [118] Mouret M., Cyr M. (2003). The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete by Geiker M.R. et al, Cement and Concrete Research, 33, 11, pp. 1901-1903.
- [119] Tattersall GH and Bloomer S.J. (1979). Further development of the two-point test for workability and extension of its range. Magazine of Concrete Research, vol. 31, pp.202-210.
- [120] Domone P.L.J., Xu Yongmo., Banfill P.F.G. (1999). Developments of the Two-Point Workability Test for High-Performance Concrete. Magazine of Concrete Research, vol. 51, pp. 181-190.
- [121] Chapdelaine F. (1998). Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais. Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès Science (M.Sc), Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval (Canada), p.32.

- [122] Wallevik O.H., Gjørsvik O.E. (1990). Development of a Coaxial Cylinder Viscometer for Fresh Concrete, Properties of Fresh Concrete. Proceedings of the Rilem Colloquium, Chapman & Hall, Hanover, pp. 213-224
- [123] Coussot P. (1993). Rhéologie des boues et laves torrentielles - Etudes de dispersions et suspensions concentrées. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et Etudes du Cemagref, 182p.
- [124] Btrheom., De Larrard F., Sztikar J.C., Hu C., Joly M. (1993). Design of a Rheometer for Fluid Concretes. RILEM Workshop Special Concretes – Workability and Mixing, 201- 208.
- [125] Hu C., De Larrard F., Sedran T., Boulay C., Bosc F., Defiorenne F. (1996). Validation of btrheom, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. Materials and Structures, vol. 29, pp.620-631.
- [126] Kaci A., Chaouche M., Andréani PA., Brossas H. (2009). Rheological behaviour of render mortars, Appl. Rheol. 19 -13794.
- [127] Chapdelaine F. (1998). Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais. Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès Science (M.Sc), Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval (Canada), p.32.
- [128] Wallevik. (2003).Rheology-A scientific approach to develop self-compacting concrete. Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 23-31.
- [129] Emborg. (1999).Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production. Proceedings of the first international RILEM Symposium, Stockholm, pp95-105.
- [130] Mouret M., Sbartai M., Picot J. (2004). Caractérisation des grandeurs rhéologiques et d'ouvrabilité: recherche de corrélation multi-échelle. Rapport de recherche, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse, 35 p.
- [131] Kurokawa Y., Tanigawa Y., Mori H., and Komura R. (1994). A Study on the Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete. Transactions of the Japan Concrete Institute, V. 16, pp. 25-32.
- [132] De Larrard F., Le Roy R. (1992). Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances. Materials and structures, 25, pp. 464 – 475.
- [133] Le Roy R., De Larrard F., Pons G. (1996). Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances, Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, pp.63 – 84.
- [134] Assié S. (2004). Durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse.
- [135] Gibbs J.C., Zhu W.J. (1999). Strength of hardened self-compacting concrete. Stockholm; Suede; pp.199-209.
- [136] De Larrard F. (1999). Concrete mixture proportioning - A scientific approach. Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, p. 448.
- [137] Pera J., Husson S., and Guilhot B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites, pp. 99 – 105.
- [138] Bouhamou N., Belas N., Mebrouki A., Mesbah H., Ammar Y.(2007). Etude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux , Sciences Technologies et Développement, ANDRU, N°2, pp. 31 – 49.

- [139] Jin J., Domone P.L. (2002). Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component. Proceedings of the first North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Centre for Advanced Cement Based Materials, North Western University, Chicago, pp. 33 – 38.
- [140] Petersson Ö. (2001). Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength. Proceedings of second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp. 277 – 284.
- [141] Felekoglu B., Yardimci M.Y., Baradan B. (2003). A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. Proceedings of third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446 – 456.
- [142] Shi et al. (1998). A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste. Transactions of the Japan Concrete Institute, vol 20, pp. 9-14.
- [143] Choi Y.W., Kim Y.J., Shin H.C., Moon H.Y. (2006). An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete. Cement and Concrete Research, 36, pp. 1595 – 1602.
- [144] Klug Y., Holschemacher K. (2003). Comparison of the hardened properties of self-compacting concrete and normal vibrated concrete, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 596 – 607.
- [145] Guneyisi E., Gesoglu M. (2008). A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag. Materials and Structures, 41, pp. 479 – 493.
- [146] Nassif H.H., Najm H. and Suksawang N. (2005). Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. Cement and Concrete Composites, vol 27, pp. 661–670.
- [147] Persson B. (2001). A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. Cement and Concrete Research, vol 31, p. 193-198.
- [148] Gram H.E. and Piiparinen P. (1999). Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp. 211-225.
- [149] Pons G., Proust E., Assié S. (2003). Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645 – 645.
- [150] Persson B. (1999). Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, pp. 239 – 250.
- [151] Hu C., Barbieri B. (1998). Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel, Science des matériaux et propriétés des béton, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, pp. 265 – 272.
- [152] Sonebi M., Bartos P.J.M. (1999). Hardened SCC and its bond with reinforcement, proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, pp. 275 – 289.

- [153] Proust E. (2002). Retraits et fluages des bétons autoplaçants: vers une meilleure compréhension des comportements différés, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, p. 230.
- [154] Mortsell E., Rodum E. (2001). Mechanical and durability aspects of SCC for road structures, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, pp. 459 – 468.
- [155] Vieira M., Bettencourt A. (2003). Deformability of hardened SCC. Proceedings of third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 637 – 644.
- [156] Coquillat G., Delfau M., Lesage R. (1984). Possibilité d'emploi des granulats calcaires de dureté moyenne à faible dans les bétons. Bulletin de liaison des LPC - Spécial XIV, pp125-131.
- [157] Buil M., Paillere A. (1984). Utilisation des fillers fins dans les bétons. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie et de l'Ingénieur, N°30, Paris, pp 193-196.
- [158] Bachiorrini A., Murat M. (1987). Evolution microstructurale des composites du système ciment alumineux-granat calcaire. II. Influence sur la porosité et les résistances mécaniques. Cement and Concrete Research, Vol 17, pp.397-403.
- [159] Çelik T., Marar T. (1996). Effect of crushed stone dust on some properties of concrete. Cement and Concrete Research, Vol 26, N°7, 1121-1130.
- [160] Beixing Li., Wang Jiliang., Zhou Mingkai. (2009). Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low and high-strength concretes. Construction and Building Materials, 23: 2846-2850.
- [161] Donza H., Cabrera O., Irassar E.F. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research 32, 1755–1761.
- [162] Loi N° 05-12. (2005). Loi relative à l'eau, Art.14, Journal Officiel de La République Algérienne. N° 60, 3-18.
- [163] Meziane El Hadj. (2016). Etude des propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage. Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb - Blida 1.
- [164] Kenai S., Benna Y., Menadi B. (1999). The effect of fines in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete. Proceeding of international conference held at the University of Sheffield.
- [165] Hebbouche A. (2002). Propriété mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage, Mémoire de magistère, sous la direction de Pr. Kenai. S, département de Génie Civil, Université de SAAD DAHLEB Blida.
- [166] Kenai S., Menadi B. (2005). Use of sand from residues of aggregates quarries in concrete. Beijing, China.
- [167] Yang R., Yang R., Shui Z., Guo C., Wu S., Gao X., Peng S. (2019). The physical and chemical impact of manufactured sand as a partial replacement material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). Cement and Concrete Composites, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.020>.
- [168] Guemmadi Z., Resheidat M., Houari H., Toumi B. (2008). Optimal criteria of Algerian blended cement using limestone fines. Journal of Civil Engineering and Management, 14(4): 269-275.

- [169] Makhloufi Z., Kadri EH., Bouhicha M., Benaïssa A., Bennacer R. (2012). The strength of the limestone mortars with quaternary binders: Leaching effect by demineralized water. *Constr Build Mater*, 36:171- 81.
- [170] Sadhouari F., Goufi N., Guezouli 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).
- [171] 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, 727–736.
- [172] Menadi B. (2008). Performance du mortier et béton à base de filler calcaire. Thèse de doctorat d'état, sous la direction de Pr Kenai Said, Département de Génie Civil, université Saad Dahleb de Blida.
- [173] Ouchi, M. (1999). State-of-the-art report on self-compactability evaluation. Proceedings of the international Workshop on Self-Compacting Concrete (CD-ROM), Kochi, Japan,
- [174] Bosiljkov V.B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, *Cement and Concrete Research*, 33, 1279–1286.
- [175] Sahmaran M., Christianto H, A., Yaman I.O. (2006). The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 5, pp. 432–440.
- [176] Carlsward et al. (2003). Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting concrete. Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
- [177] Shafigh P., Nomeli M. A., Alengaram U. J., Mahmud H. B. and Jumaat., M. Z. (2016). Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 135, 148–157.
- [178] Sonebi M., (2004). Self-Compacting Concrete Using Ground Granulated Blastfurnace Slag in Hot Climate. The Annual conference Concrete Technology and Corrosion Protection Conference, Dubai.
- [179] Tarun R. Naik., Rudolph N. Kraus., Yoon-moon Chun., Fethullah Canpolat and Bruce W. Ramme. (2005). Use of limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete, Three-Day International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, Toronto, CANADA.
- [180] El Hilali A. (2009). Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants BAP: influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de doctorat, University de Cergy-Pontoise, 200p.
- [181] La durabilité des bétons. (2002). Livre, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 75007, Paris.
- [182] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. (2004). A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag. *Cement and Concrete Research*, vol 34, pp. 615–622.
- [183] Tsivillis S., Tsantilas J., Kalkali G., Chaniotakis E., Sakellariou A. (2003). The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement Concrete Research*, 26(6):2345.

- [184] Boel V. (2006). Microstructure of self-compacting concrete in relation with gas permeability and durability aspects. PhD thesis, Ghent University, Belgium, p. 320.
- [185] Zhu W., Quinn J., Bartos P.J.M. (2001). Transport properties and durability of self-compacting concrete. Proceedings of second International Symposium on Self Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458.
- [186] De Schutter G. and Audenaert K. (2004). Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. Materials and Structures, Vol. 37, pp. 591-596.
- [187] Dinakar P., Babu K.G. and Santhanam M. (2008). Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes. Cement and Concrete Composites, vol 30, pp. 880–886.
- [188] Perraton D., Aitcin P.C. et Carles-Gibergues A. (1999). Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons: perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol 221, pp. 69-78.
- [189] Trägårdh J. (1999). Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp.175-186.
- [190] De Schutter G., Audenaert K., Boel V., Vandewalle L. et al. (2003). Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a Belgian research project” Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp.799-807.
- [191] Boukendakdji O. (2010). Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un BAP: Optimisation des conditions opératoires, Thèse de doctorat, Université de Blida, p 95, 96.
- [192] Bonavetti V., Donza H., Rahhal V., Irassar E. (2000). Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. Cement and Concrete Research, 30, 703-708.
- [193] Hornain H., Marchand J., Moranville-Regourd, M. (1995). Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. Cement Concrete Research, vol. 125, no. 8, pp. 1667-1678.
- [194] Tezuka Y., Gomes D., Martins J.M., and Djanikian J.G. (1992). Durability Aspects of Cements with High Limestone Filler Content, 9th International Congress of the Chemistry of Cement, New Delhi, India, vol. V, pages 53-59.
- [195] Tang L., Andalen A., Johansson J.O. and Hjelm S. (1999). Chloride diffusivity of self-compacting concrete. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp.187-198.
- [196] Rougeau P., Maillard J.L. and Mary-Dippe C. (1999). Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 251-261.
- [197] Attiogbe E.K., See H.T., Daczko J.A. (2002). Engineering properties of self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center, pp. 371 – 376.

- [198] Audenaert K., De Schutter G. (2003). Chloride penetration in self-compacting concrete. Proceedings of third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 818 – 825.
- [199] Trägårdh J., Skoglund P., Westerholm M. (2003). Frost resistance, chloride transport and related microstructure of field self-compacting concrete, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 881 – 891.
- [200] Papadakis V. G. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, *Cement and Concrete Research*, 30, 291-299.
- [201] Chang C.F., Chen J.W. (2005). Strength and elastic modulus of carbonated concrete, *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 5, September-October 2005.
- [202] Thiéry M. (2006). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 52.
- [203] Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, V. 88, No. 4.
- [204] Sakata K. (1998). Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete. CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB.
- [205] Boel V., Audenaert K., De Schutter G. (2005). Experimental durability evaluation of selfcompacting concrete with limestone filler. Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 297-303.
- [206] Baron J and Douvre C. (1987). Technical and Economical Aspects of the Use of Limestone Filler Additions in Cement, *World Cement*, vol. 18, no. 3.
- [207] Audenaert K., De Schutter G. (2003). Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete, Proceedings (SP 212) of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp.451 – 465.
- [208] Pigeon M., Marchand J., Pleau R. (1996). Frost resistant concrete, *Construction and Building Materials*, 10, pp. 339 – 348.
- [209] Persson B. (2003). Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, (3), pp. 373.379.
- [210] Devillers p and al. (2005). Validation de la calorimétrie basse température comme outil de précision de la tenue au gel des bétons. XXIIeme rencontres universitaires de génie civil.
- [211] Mohamed AS. (2011). Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, p. 56.
- [212] Brunetaud X. (2005). Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton Thèse de doctorat en Physico-chimie des Matériaux. Ecole Centrale des Arts et Manufactures – Ecole Centrale de Paris.
- [213] Pavoine A. (2003). Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite. Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

- [214] Rozière E. (2007). Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, p. 250.
- [215] Nehdi M., Pardhan M., Koshowski S. (2004). Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements, *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 2103 – 2112.
- [216] Bassuoni M.T., Nehdi M.L. (2009). Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 206 – 226.
- [217] Persson B. (2003). Sulphate resistance of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1933 – 1938.
- [218] NF P 15-471. (1990). Méthode d'essais des ciments, détermination des résistances mécaniques, Paris.
- [219] Felekoglu B., Turkel S. and Baradan B. (2007). Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, vol 42, pp. 1795–1802.
- [220] López C.D., Fonteboa G.B., Brito D.J., Abella M.F., Taboada G.I., Silva P.(2015). Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 491–501.
- [221] Güneyisi E., Gesoglu M., Algin Z., Yazici H. (2016). Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 622-630.
- [222] De Larrard F., Cazacliu B., Chopin D., and Château E. (2003). Production of SCC” 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp. 481-494.
- [223] Bonavetti V.L., Irassar E.F. (1994). The effect of stone dust content in sand. *Cement and concrete research*, vol. 24, No. 3; pp-590.
- [224] EN 12350-8. (2014). Essai pour béton frais - Partie 8: Béton auto-plaçant – Essai d'étalement au cône d'Abrams.
- [225] EN 12350-9. (2014). Essai pour béton frais - Partie 9: Béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V.
- [226] EN 12350-10. (2014). Essai pour béton frais - Partie 10: Béton auto-plaçant Essai à la boîte en L.
- [227] EN 12350-11. (2014). Essai pour béton frais - Partie 11: Béton auto-plaçant Essai de stabilité au tamis.
- [228] Hamza S., Kadri EH., Ngo TT., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S. (2014). A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation. *Applied Rheology*, vol. 24(2), pp. 22594.
- [229] Lanos C., Estellé P. (2009). Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol 13(4), pp. 457-471.
- [230] Koehler E., Fowler D., Ferraris C., Amziane S. (2006). New portable rheometer for fresh selfconsolidating concrete, *ACI Materials Journal*, Vol 233, pp97-116.
- [231] Soualhi H., Kadri E.H, Ngo T.-T., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S.(2013). A Vane Rheometer for Fresh Mortar: Development and Validation, *Journal Applied Rheology*, DOI: 10.3933/APPLRHEOL-24-22594.

- [232] NF EN 12390-3. (2003). Essai pour béton durci, Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes.
- [233] NF EN 12390-5. (2012). Essais pour béton durci - Partie 5: résistance à la flexion sur éprouvettes Tests for hardened concrete - Part 5: flexural strength of the specimens. France.
- [234] NF P18-459. (2010), Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique.
- [235] AFPC-AFREM. (1997). Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons, Toulouse.
- [236] Nordtest Method NT Build 492. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
- [237] Westerholm M., Lagerblad B., Silfwerbrand J. and Forsberg E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, vol 30, pp. 274–282.
- [238] Fang W., Jianxiong C. and Changhui Y. (1999). Studies on Self-Compacting High Performance Concrete with high volume mineral additives. *Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden*, pp. 569-578.
- [239] Spengler A. and Schiessl P. (2001). Sand-rich Self Compacting Concrete. *Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete, Japan*, pp. 387-392.
- [240] Joudi, I., Lecomte, A., Ben-Ouezdou, M., Achour, T. (2012). Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cement and Concrete Composite*. 34:771–780.
- [241] Bosiljkov V.B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 33:1279–86.
- [242] Benabed, B., Kadri, E.L., Azzouz, L., Kenai, S. (2012), Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement and Concrete Composite*, 34:1167– 1173.
- [243] EN 12350-10. (2010). Testing fresh concrete Part 10: self-compacting concrete – L-box test. European Committee for Standardization.
- [244] EN 12350-11. (2010). Testing fresh concrete Part 10: self-compacting concrete – Sieve segregation test. European Committee for Standardization.
- [245] Sethy K.P., Pasla D., Sahoo U.K. (2016). Utilization of high volume of industrial slag in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, vol.112, pp. 581-588.
- [246] Dinakar P., Sethy K.P., Sahoo U.C. (2013). Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. *Materials and structures*, vol. 43, pp. 161–169.
- [247] Tuyan M., Mardani-Aghabaglou A., Ramyar K. (2014). Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials and Design*, vol. 53, pp. 983–991.
- [248] Ohno A., Edamatsu Y., Sugamata T. and Ouchi M. (2001). The mechanism of time dependence for fluidity of high belite cement mortar containing polycarboxylate based superplasticizer. *Proceedings of the second International Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton. Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 169-178.
- [249] Hamza, S., Kadri, E.H., Ngo, T.T., Bouvet, A., Cussigh, F., Kenai, S. (2014). A new vane rheometer for fresh mortar: development and validation. *Appl. Rheol.* 24 (2):22594:7.

- [250] De larrard F., Belloc A. (1999). L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées – 219 – REF, 4246 – PP.41-52.
- [251] Bonavetti VL., Irassar EF. (1994). The effect of stone dust content in sand. Cement and Concrete Composite, 24(3):580–90.
- [252] Benna Y. (1998). Valorisation du sable de concassage. 1er colloque maghrébin en génie civil, Algérie, Biskra.
- [253] Nordtest Method NT Build 492. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
- [254] 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.
- [255] Nehdi M. (1998). Microfiller effect on rheology, microstructure, and mechanical properties of high-performance concrete (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- [256] Valcuende M., Marco E., Parra C and 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.
- [257] 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.
- [258] Soualhi H., Kadri E. H., Ngo T. T., Bouvet A., Cussigh F and Benabed B. (2015). Rheology of ordinary and low-impact environmental concretes. Journal of Adhesion Science and Technology, 29(20), 2160-2175.
- [259] Benaïcha M., Jalbaud O., Alaoui A. H and Burtschell Y. (2015). Marsh cone coupled to a plexiglas horizontal channel: Rheological characterization of cement grout. Flow Measurement and Instrumentation, 45, 126-134.
- [260] Benabed B., Azzouz L., Kadri E. H., Kenai S and 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.
- [261] 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. Appl Rheol, 27-14490.
- [262] Zakaria Skender., Abderrahim Bali and Ratiba Kettab. (2019). Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. European Journal of Environmental and Civil Engineering.
- [263] Emmanuel Rozière., Sébastien Granger., Ph Turcry., Ahmed Loukili. (2007). Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Composites, 29 (8), pp.626-636.

Annexe A

Exemple de calcul de la composition du mortier

A.1 Les données

Pour un volume du mortier de $V=1.3$ l (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants:

- Ciment: $C = 3143 \text{ kg/m}^3$
- Sable: $S = 2670 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant: $Sp = 1065 \text{ kg/m}^3$
- Eau: $E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable $Ab = 1.763\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier $S/M = 0.50$

On fixe le rapport (par poids) $E/C = 0.40$ ou (par volume) $E/C = 1.257$.

Le superplastifiant (MEDAFOW 145) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : % $Sp = 1,4$ % du poids de ciment (ou poudres).

A.2 Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable de masse M_1 , on le met dans l'étuve à 105°C pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse M_2 , et on calcul l'humidité du sable μ_s :

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction:

$$\text{Correction} = \mu_s - Ab$$

A.3 Calcul des quantités de chaque constituant

A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment $C\%$:

$$\%C_v = \frac{(1 - S/M)}{1 + E/C_{\text{Parvolume}}} \times 100$$

La quantité de ciment C en kg:

$$C(\text{kg}) = \frac{V \times E/C_{\text{par volume}}}{100} \times \rho_c$$

A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg, est S:

$$S(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\text{correction}}{100}\right) \times \left(\frac{V \times S/M \times \rho_s}{100}\right)$$

A.3.3 Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp:

$$Sp(\text{kg}) = \frac{\% Sp \times C}{100}$$

B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E), est divisée en deux parties une première partie E₁, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute, et la deuxième quantité E₂ (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume: % E_{vol}

$$\% E_{\text{vol}} = \frac{(1 - S/M) \times 100 \times E/C_{\text{par volume}}}{(1 + E/C_{\text{Parvolume}})}$$

La quantité d'eau globale E en litre:

$$E_{\text{litre}} = \left(\frac{V \times \% E_{\text{vol}}}{100} \times \frac{\rho_E}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \times 70}{100}\right) - \left(\frac{V \times S/M \times \rho_s}{1000} \times \frac{\text{correction}}{100}\right)$$

Eau 1 : $E_1(\text{kg}) = 0.7E$

Eau 2 : $E_2(\text{kg}) = 0.3E$

| Essais sur Mortier pour un volume de 1.7 litres. | | | | | | |
|--|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|-------------|
| Référence du mélange | Mor 0%FC CEM I 42.5 sans ajout | | | Date | 03/03/2016 | |
| volume de mortier (litres) | 1.3 | | | | | |
| | 0.5 | | | | | |
| E/P par vol. | 1.2572 | poudre vol (%) | 22.15 | Eau volume (%) | 27.85 | |
| composition Poudre(vol %) | type | | | | | |
| ciment portland | 100 | | | | | |
| Laitier | 0 | | | | | |
| Fumée de Silice | 0 | | | | | |
| Pouzolane | 0 | | | | | |
| superplast - MEDAFLOW145 | 0.4 % (Sp/P) | | | | | |
| humidité sable | | | | | | |
| | | | humidité (%) | sorption (correction (%)) | | |
| poids humide (gms) | 200 | 0.0 | 1.7 | -1.7 | | |
| poids sec (gms) | 200 | | | | | |
| Materiaux/Type | vol litres | densité kg/m ³ | contenance d'eau kg | | poind mélange kg | |
| ciment | 0.288 | 3143 | | | 0.905 | |
| Laitier | 0.000 | 2950 | | | 0.000 | |
| Fumée de silice | 0.000 | 2900 | | | 0.000 | |
| Pouzolane | 0.000 | 2680 | | | 0.000 | |
| Eau | 0.362 | 1000 | 0.362 | | | 0.389 |
| | | | total | | | W1 0.2334 |
| | | | | | | W2 0.1556 |
| superplast - MEDAFLOW145 | | 1065 | 0.004 | 70 | 0.003 | 0.00362 |
| Sable | 0.650 | 2670 | 1.736 | -1.7 | -0.030 | 1.706 |
| | | | | | | 0/3 1.109 |
| Total | 1.300 | | | | | Roulé 0.597 |
| | | | | | | 3.004 |
| | | w/p bt wt = | 0.4000 | | | |

Annexe B

Exemple de calcul de la composition du béton autoplaçant:

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant:

B.1 Les Données

Pour un volume de béton de $V=30$ litres (par exemple)

❖ Les masses volumiques :

- Masse volumique apparente du gravier : $\rho_G = 1487 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue du gravier : $\rho_{AG} = 2707 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue du sable : $\rho_S = 2584 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$

❖ Les coefficients d'absorption :

- Coefficient d'absorption du sable : $AbS = 0.64\%$
- Coefficient d'absorption du gravier : $AbG = 0,5\%$

❖ Le rapport Sable/Mortier : $S/M = 0.50$

❖ Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

❖ Le volume d'air dans le béton en pourcentage: $A=1\%$ du volume du béton

❖ Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{\text{volume}}=1.215$ par unité de volume de ciment et $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}}/\rho_A = 0.4$ par unité de poids de ciment

❖ Le superplastifiant (MEDAFOW 145) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : $\% Sp = 1,4 \%$ du poids de ciment (ou poudres).

B.2 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 , et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable :
$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

L'humidité du gravier:
$$\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

B.3 Calcul des différents composants

B.3.1 Gravier

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V

$$G(\text{kg}) = \left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right) \times \left(\frac{G(\text{kg}/\text{m}^3) \times V}{1000}\right)$$

B.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton:

$$\%G = \frac{G(\text{kg}/\text{m}^3) \times V}{\rho_{aG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton:

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable S dans le béton:

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

La quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton:

$$S(\text{kg}) = \left(\frac{\% S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \right) \times \left(1 - \frac{\mu_S - A_{BS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition.

B.3.3 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P):

$$\% P = \% M - \% S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C):

$$\% C = \frac{1}{1 + E/C_{\text{volume}}} \times \% P$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton:

$$C(\text{kg}) = \% C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

B.3.4 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m³)

$$Sp(\text{kg/m}^3) = \% C \times \rho_C \times 10 \times \frac{\% Sp}{100}$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton:

$$Sp(\text{kg}) = Sp(\text{kg/m}^3) \times V$$

B.3.5 Eau

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux parties : la première partie (E1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E):

$$\% E = \frac{E/C_{\text{par volume}}}{(1 + E/C_{\text{Par volume}})} \times \% P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite:

L'eau contenue dans le sable: e_1

$$e_1(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left(\frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier: e_2

$$e_2(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg/m}^3) \times V}{1000} \left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant: e_3

$$e_3(\text{kg}) = \frac{Sp(\text{kg}) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton:

$$E(\text{kg}) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec:

Eau 1 : $E_1(\text{kg}) = 0.7E$

Eau 2 : $E_2(\text{kg}) = 0.3E$

| Composition et Résultat d'un BAP de 30 litres de volume | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------|--------------------|-----------------|---------------|-----------|----------------|---------|--------|
| Date 10/03/2016 | | | | | | | | | |
| mesures d'humidité | | | | | | | | | |
| Densités relatives | Gravier | 2.62 | | Absorptions (%) | | | Pds Hum | Pds sec | |
| | Sable | 2.67 | | Gravier | 1.65 | 8/15 | | | |
| | Ciment | 3.143 | | | | 3/8 | | | |
| | Fines | 0 | | Sable | 1.7 | Sable | | | |
| gravier | | | | | | | | | |
| Densité | | 1340 | kg/m ³ | | % gravier | 28.669 | vol % de béton | | |
| percent | | 56.0547 | | | Gravier | 751.133 | kg/m3 | | |
| 8/15:3/8 | | 0.67 | | | 8/15 | 300.46 | kg/m3 | | |
| | | | | | 3/8 | 450.67 | kg/m3 | | |
| air | | | | | | | | | |
| | | 1 | vol % de béton | | | | | | |
| Sable | | | | | | | | | |
| volumé mortier | | 70.3 | vol % de béton | | % Sable | 35.165 | vol % de béton | | |
| Sable | | 50 | vol % de mortier | | Sable | 938.916 | kg/m3 | | |
| pate | | | | | | | | | |
| volumé | | 35.2 | vol % de béton | | % Eau | 19.586 | vol % de béton | | |
| E/P volumé | | 1.2572 | | | Eau | 195.862 | kg/m3 | | |
| Poudre | | 15.6 | vol % de béton | | | | | | |
| Ciment | | 100 | vol % de poudre | | Ciment | 15.579 | vol % de béton | | |
| Fines | | 0 | vol % de poudre | | Ciment | 489.655 | kg/m3 | | |
| Densité relative poudre | | 3.143 | | | | | | | |
| E/P Poids | | 0.40000 | | | % Fines | 0.000 | vol % de béton | | |
| | | | | | Fines | 0.000 | kg/m3 | | |
| superplastifiant: MEDAFLOW145 | | | | | | | | | |
| dosage | | 1.4 | % liquid de poudre | | superplast | 6.855 | kg/m3 | | |
| Mélange vol (litres) | | 30 | litres | | | | | | |
| Densité Béton | | 2382 | kg/m3 | | Poids Mélange | 71.473 | kg | | |
| Poids Mélange | | | | | | | | | |
| | | prop.mél | Pds mél | absorption | humidité | extra eau | Poids | | |
| | | kg/m3 | kg | % | % | kg | kg | | |
| Gravier 8/15 | | 300 | 9.014 | 1.65 | 0.00 | -0.15 | 8.865 | | |
| Gravier 3/8 | | 451 | 13.520 | 1.65 | 0.00 | -0.22 | 13.297 | | |
| Sable | | 939 | 28.167 | 1.7 | 0.00 | -0.48 | 27.689 | 0/3 | 17.998 |
| Ciment | CPA (ACC) 42,5 | 490 | 14.690 | | | | 14.690 | Roulé | 9.691 |
| Fines | Laitier | 0 | 0.000 | | | | 0.000 | | |
| Eau | | 196 | 5.876 | | | | | | |
| Superplast | MEDAFLOW145 | 6.86 | 0.2057 | | 70 | 0.14 | 0.206 | 205.655 | |
| composition eau | | | | | | | 6.583 | eau 1 | 3.950 |
| | | | | | | | | eau 2 | 2.633 |
| total | | 2382 | 71.47 | | | -0.71 | 71.329 | | |