

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB -BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécilité : Génie civil

**PERFORMANCE DU BETON AUTOPLACANT A BASE DE SABLE
DE CONCASSAGE DE DEFFERENTES SOURCES**

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Par

MENADI AICHA

KEBILENE IMANE

Devant le jury composé de

| | | | |
|-----------------|-------|-------------------------|--------------|
| SAID KENAI | Prof. | U. Saad Dahleb-Blida | President |
| Walid YAHIAOUI | M.C.B | U. Saad Dahleb-Blida | Examineur |
| BELKACEM MENADI | Prof. | U. Saad Dahleb-Blida | Promoteur |
| Smain BENYAMINA | Dr | U. DB de Khemis miliana | Co-Promoteur |

Blida , septembre 2020

ملخص

مع تطور صناعة البناء اصبح شكل المباني اكثر تعقيدا. و قد أدى ذلك الى تطوير الأبحاث حول المواد المستخدمة في البناء. مما أدى الى ظهور أنواع جديدة من الخرسانة بما في ذلك الخرسانة ذاتية التماسك . والتي تتميز بوضعها من خلال تأثير الجاذبية . تتطلب صياغة الكثير من الغرامات المتواجدة في الرمال المكسرة للحصول على تناسق و تجانس جيد.

تكسير الرمال بكثرة في المحاجر التي تحتوي على كمية كبيرة من الحجر الجيري الناعم الذي يثبت انه حل مناسب لتشكيل الملاط و/ او الخرسانة المضغوطة ذاتيا . تم اجراء العديد من الدراسات البحثية حول تأثير تكسير الرمال من مصدر محجر واحد على خصائص الخرسانة المرصوفة ذاتيا.لا يزال يتعين توضيح أداء الملاط او الخرسانة المضغوطة ذاتيا على أساس تكسير الرمال من مصادر مختلفة.

اقتصر عملنا البحثي على مراجعة ببلوغرافية لتأثير رمل التكسير على الخصائص الريولوجية و الميكانيكية و المتانة للملاط الخرسانة العادية والمضغوطة ذاتيا.

وفقا لهذه الدراسة فان الحجر الجيري الناعم الناتج عن تكسير الرمل له تأثير ملحوظ على الخصائص الريولوجية و الميكانيكية و المتانة للخرسانة العادية او الخرسانة المضغوطة.

الكلمات المفتاحية: الرمل المسحوق، الحبيبات الكلسية الناعمة، الخرسانة المرصوفة ذاتيا، الخصائص الميكانيكية..

RESUME

Avec le développement du domaine de la construction, la forme des bâtiments s'est complexifiée. Cela a conduit au développement de la recherche sur les matériaux utilisés dans la construction, aboutissant à de nouveaux types de bétons, dont le béton autoplaçant qui se caractérise par sa mise en place par l'effet de la gravité. Sa formulation nécessite beaucoup de fines qui se trouvent dans le sable de concassage pour avoir une bonne cohérence et homogénéité.

Le sable de concassage est très abondant dans les carrières contenant une grande quantité de fines calcaires qui s'avère une solution appropriée pour la formulation des mortiers et/ou bétons autoplaçants. Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur l'effet du sable de concassage provenant d'une seule source de carrière sur les propriétés du béton autoplaçant. Cependant, la performance du mortier ou béton autoplaçant à base de sable de concassage de différentes sources reste à éclaircir.

Notre travail de recherche s'est limité à une revue bibliographique sur l'influence du sable de concassage sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du mortier/béton ordinaire et autoplaçant.

D'après cette étude, les fines calcaires issus du sable de concassage ont un effet remarquable sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité du béton ordinaire ou béton autoplaçant.

Mots-clés : sable de concassage, fines calcaires, béton autoplaçant, rhéologie, résistance, durabilité.

ABSTRACT

With the development of the construction industry, the shape of buildings has become more complex. This has led to the development of research on materials used in construction, resulting in new types of concrete, including self-consolidating concrete among its characteristics its placement by the effect of gravity. Its formulation requires a lot of fines which are found in the crushing sand to have good consistency and homogeneity.

In Algeria, crushing sand is very abundant in quarries containing a large amount of fine limestone, which could to be an appropriate solution for the formulation of self compacting mortars or concrete. Several research studies have been carried out on the effect of crushing sand from a single quarry source on the properties of self-compacting concrete. However, the performance of mortar or self-compacting concrete based on crushing sand from different sources remains to be clarified.

Our research work was limited to a research review on the influence of crushing sand on the rheological, mechanical and durability properties of ordinary and self-compacting concrete.

According to this study, the fine limestones issued from crushed sand have a remarkable effect on the rheological, mechanical and durability properties of concrete.

Keywords: crushed sand, limestone fines, self-compacting concrete, rheology, strength, durability

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier dieu,

De nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener à terme notre projet de fin d'étude et pouvoir réaliser ce travail de recherche.

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements à nos encadreurs Pr. **MENADI BELKACEM** et Dr. **BENYAMINA SMAIN** qui nous ont guidé avec leurs précieux conseils et suggestions, et la confiance qu'ils nous ont témoignés tout au long de ce travail.

Nous tenons à gratifier aussi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Nous adressons aussi nos remerciements au Pr **KENAI SAID** Directeur du Laboratoire Géo -matériaux et matériaux à l'université de blida 1 et Dr. **YAHIAOUI WALID** pour leurs aides et conseils.

Enfin, on adresse nos sincères sentiments de gratitude et de reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLES DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| ملخص | 2 |
| RESUME | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| <i>Remerciement</i> | 5 |
| TABLES DES MATIERES | 6 |
| LISTE DES TABLEAUX | 9 |
| LISTE DES FIGURES | 9 |
| LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRIVIATIONS | 13 |
| INTRODUCTION GENERALE | 14 |
| 1 CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SABLE DE CONCASSAGE. | 16 |
| 1.1 Introduction | 16 |
| 1.2 Fabrication des granulats | 16 |
| 1.2.1 Granulats pour mortier et béton | 16 |
| 1.2.2 Fabrication des granulats dans le monde | 17 |
| 1.2.3 Fabrication des granulats en Algérie | 18 |
| 1.3 Valorisation de sable de concassage | 20 |
| 1.3.1 Caractéristiques de sable de concassage | 20 |
| 1.3.2 Avantages et inconvénients de sable de concassage | 21 |
| 1.4 Conclusion | 21 |
| 2 CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE CONCASSAGE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS. | 22 |
| 2.1 Introduction | 22 |
| 2.2 Généralités sur les BAP | 22 |
| 2.3 Principaux constituants des BAP | 24 |
| 2.4 Formulation des BAP | 25 |
| 2.4.1 Méthode japonaise | 25 |
| 2.4.2 Méthode suédoise : | 27 |
| 2.4.3 Méthode Française (LCPC) | 27 |
| 2.5 Utilisation de sable de concassage dans la confection du mortier et/ ou béton autoplaçant | 28 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.6 | Effet de sable de concassage sur les propriétés des mortiers et béton ordinaire et/ ou autoplaçant à l'état frais | 29 |
| 2.6.1 | Béton et mortier ordinaire | 29 |
| 2.6.1.1 | Masse volumique | 29 |
| 2.6.1.2 | L'ouvrabilité | 33 |
| 2.6.1.3 | Rhéologie | 36 |
| 2.6.2 | Béton et mortier autoplaçant | 39 |
| 2.6.2.1 | Masse volumique | 39 |
| 2.6.2.2 | L'ouvrabilité | 41 |
| 2.6.2.3 | Rhéologie | 43 |
| 2.7 | Effet de sable de concassage sur les propriétés mécaniques et durabilité des mortiers et bétons ordinaire et/ ou autoplaçant | 47 |
| 2.7.1 | Mortier et béton ordinaire | 47 |
| 2.7.1.1 | Résistance à la compression | 47 |
| 2.7.1.2 | Résistance à la flexion | 50 |
| 2.7.1.3 | Module d'élasticité | 52 |
| 2.7.1.4 | Le retrait | 53 |
| 2.7.2 | Mortier ou béton autoplaçant | 55 |
| 2.7.2.1 | Résistance à la compression | 55 |
| 2.7.2.2 | Résistance à la flexion | 58 |
| 2.7.2.3 | Module d'élasticité | 60 |
| 2.7.2.4 | Le retrait | 61 |
| 2.8 | Effets de sable de concassage sur les indicateurs de durabilité du béton et mortier ordinaire et/ ou autoplaçant | 66 |
| 2.8.1 | Béton et mortier ordinaire | 66 |
| 2.8.1.1 | Perméabilité à Léau | 66 |
| 2.8.1.2 | Absorption capillaire | 68 |
| 2.8.1.3 | Perméabilité é au gaz | 69 |
| 2.8.1.4 | Perméabilité aux Ions chlorure | 70 |
| 2.8.1.5 | Résistance aux sulfates | 72 |
| 2.8.2 | Béton et mortier autoplaçant | 73 |
| 2.8.2.1 | Perméabilité à Léau | 73 |
| 2.8.2.2 | Absorption capillaire | 74 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.8.2.3 | Perméabilité au gaz | 77 |
| 2.8.2.4 | Perméabilité aux Ions chlorure | 79 |
| 2.8.2.5 | Résistance au sulfate | 82 |
| 2.9 | Conclusion | 83 |
| 3 | CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS | 84 |
| 3.1 | Introduction | 84 |
| 3.2 | Caractéristiques des matériaux utilisés | 84 |
| 3.2.1 | Ciment | 84 |
| 3.2.2 | Sable | 84 |
| 3.2.3 | Fillers Calcaires | 86 |
| 3.2.4 | Superplastifiant | 87 |
| 3.2.5 | L'eau de gâchage | 87 |
| 3.3 | Formulation des mortiers autoplaçants | 87 |
| 3.3.1 | Fixation du rapport Eau/Liant (E/L) | 88 |
| 3.3.2 | Fixation du rapport Sable/Mortier (S/M) | 88 |
| 3.3.3 | Fixation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L) | 88 |
| 3.4 | Essais sur le béton autoplaçant à l'état frais | 89 |
| 3.4.1 | Essais d'ouvrabilité | 89 |
| 3.4.1.1 | Essai d'étalement (Slump flow test) | 89 |
| 3.4.1.2 | Essai à l'entonnoir en V (V-funnel test) | 90 |
| 3.4.1.3 | Essai de la boîte en L | 91 |
| 3.4.1.4 | Essai de stabilité au tamis | 92 |
| 3.4.2 | Essai de rhéologie | 93 |
| 3.5 | Essais du béton à l'état durci | 95 |
| 3.5.1 | Résistance à la compression | 95 |
| 3.5.2 | Résistance 1à la traction par flexion | 95 |
| 3.6 | Durabilité | 97 |
| 3.6.1 | Absorption capillaire | 97 |
| 3.7 | Conclusion | 98 |
| 4 | CONCLUSION GENERALE | 99 |
| 5 | Références bibliographiques | 101 |

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SABLE DE CONCASSAGE.

| | |
|--|----|
| Tableau 1-1: Comparaison entre le taux de consommation des granulats | 18 |
| Tableau 1-2 : production de sable concassé en 2009 | 19 |

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

| | |
|--|----|
| Tableau 3-1 : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé | 84 |
| Tableau 3-2 : Composition chimique et minéralogique du sable de concassage | 85 |
| Tableau 3-3 : composition chimique des fines calcaires | 86 |
| Tableau 3-4 : Classification des BAP selon le domaine d'application. | 90 |

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SABLE DE CONCASSAGE.

| | |
|---|----|
| Figure 1-1 : Production mondiale de sable et de gravier par pays 2014-2019 [5]. | 18 |
| Figure 1-2 : Production des agrégats en m3 année 2009. [6] | 19 |
| Figure 1-3 : Production de sable concassé m3 année 2009. [6] | 20 |

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE CONCASSAGE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACENTS.

| | |
|---|----|
| Figure 2-1 : Exemple d'un coulage d'une dalle en béton autoplaçant. | 23 |
| Figure 2-2 : constituants des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants[62]. | 24 |
| Figure 2-3 : Cône pour mesurer l'étalement des mortiers. | 26 |
| Figure 2-4 : Entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers. | 26 |
| Figure 2-5 : Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.[24] | 30 |
| Figure 2-6 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines. [25] | 31 |
| Figure 2-7 : Variation de la masse volumique des bétons ordinaires avec des fines calcaires en fonction du temps. [26] | 32 |
| Figure 2-8 : Evolution de la masse volumique des bétons en fonction de la durée de Conservation. [27] | 32 |
| Figure 2-9 : Effets des fines calcaires sur l'affaissement du béton. [29] | 33 |
| Figure 2-10 : Effet de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines. [24] | 34 |
| Figure 2-11 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de calcaire. [26] | 35 |
| Figure 2-12 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité en fonction de la teneur en fines dans le sable. [31] | 36 |
| Figure 2-13 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide des coulis de ciment sans Sp - Modèle de Legrand – [32] | 37 |
| Figure 2-14 : Variation du seuil de cisaillement des mortiers au calcaire pour différents types et dosages en superplastifiant. [35] | 38 |

| | |
|---|----|
| Figure 2-15 : Variation de la viscosité plastique des mortiers au calcaire pour différents types et dosages en superplastifiant. [35] | 39 |
| Figure 2-16 : Masses volumiques réelles des bétons à superplastifiant. [36] | 40 |
| Figure 2-17 : Masses volumiques réelles des bétons courants.[36] | 40 |
| Figure 2-18 : Masses volumiques des bétons. [37] | 41 |
| Figure 2-19 : Etalement, temps d'écoulement Tv-funnel en fonction de la teneur en fines de calcaire. [38] | 42 |
| Figure 2-20 : Histogramme des temps d'écoulement des trois mortiers élaborés.[39] | 42 |
| Figure 2-21 : Influence de la variation du rapport F/C sur le diamètre d'étalement.[40] | 43 |
| Figure 2-22 : Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement en fonction des fines calcaires. [38] | 44 |
| Figure 2-23 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement. [38] | 44 |
| Figure 2-24 : Variation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement Tv-Funnel . [38] | 45 |
| Figure 2-25 : Corrélation entre temps d'écoulement et viscosité plastique du BAP. [38] | 45 |
| Figure 2-26 : Effet des additions sur le seuil de cisaillement. [41] | 46 |
| Figure 2-27 : Effet des additions sur la viscosité des BAP. [41] | 47 |
| Figure 2-28 : Développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires. [45] | 48 |
| Figure 2-29 : Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux De calcaire. [26] | 49 |
| Figure 2-30 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de conservation pour les éprouvettes conservées dans l'eau de mer. [27] | 49 |
| Figure 2-31 : Résistance à la traction par flexion des mortiers et bétons en fonctionDe pourcentage de fines (benna). [25] | 50 |
| Figure 2-32 : Résistance à la flexion en filler calcaire. [46] | 51 |
| Figure 2-33 : Variation de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction du mode d'incorporation des fillers calcaires.[47] | 51 |
| Figure 2-34 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge pour les deux taux de substitutions de filler calcaire.[48] | 52 |
| Figure 2-35 : Evolution de modules de Young en fonction de pourcentage de filler. [45] | 53 |
| Figure 2-36 : Développement du retrait du béton à base de sable de concassage avec différents taux de fines. [49] | 54 |
| Figure 2-37 : Retrait des bétons à 28 jours, en fonction de la teneur en fillers. [52] | 55 |
| Figure 2-38 : Relation entre la résistance à la compression et la teneur en fine de calcaire. [38] | 56 |
| Figure 2-39 : Effet des fines sur l'évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un béton ordinaire. [53] | 56 |
| Figure 2-40 : Résistance à la compression des BAP et BO. [56] | 57 |
| Figure 2-41 : Evolution de résistance à la compression des bétons autoplaçants. [35] | 58 |
| Figure 2-42 : Relation entre la résistance à la flexion et la teneur en FC. [38] | 58 |

| | |
|--|----|
| Figure 2-43 : Evolution de la résistance à la flexion à 28 jours des trois types de Mortiers. [39] | 59 |
| Figure 2-44 : Influence de la finesse du filler sur la résistance à la traction des Différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours. [57] | 60 |
| Figure 2-45 : Module d'élasticité à 28 jours et à 90 jours. [60] | 61 |
| Figure 2-46 : Retrait plastique (comparaison entre BAP et BO) [58] | 62 |
| Figure 2-47 : Retrait plastique des BA et BV. [62] | 62 |
| Figure 2-48 : Retrait endogène des BA et BV. [63] | 63 |
| Figure 2-49 : Influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait endogène du béton autoplaçant (BAP). [62] | 64 |
| Figure 2-50 : Influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait de dessiccation du béton autoplaçant (BAP). [65] | 65 |
| Figure 2-51 : Influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait total – échelle logarithmique [64] | 66 |
| Figure 2-52 : Profondeur de pénétration à 90 jours en fonction des différents types de ciments (A, B, C, D). [43] | 67 |
| Figure 2-53 : Coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différents pourcentages de poussière de concassage à l'âge de 28 jours. [68] | 67 |
| Figure 2-54 : Absorption du béton à 28 jours d'âge contenant différents pourcentage De poussières de concassage.[68] | 68 |
| Figure 2-55 : Evolution du coefficient de capillarité en fonction du pourcentage des fillers dans le béton. [70] | 69 |
| Figure 2-56 : Valeurs du coefficient de la perméabilité au gaz des bétons avec et sans fines Pour différents types de ciments. [69] | 70 |
| Figure 2-57 : Pénétration des ions de chlorure des bétons avec cure humide et à l'air. [30] | 71 |
| Figure 2-58 : Influence de fines calcaires sur la perméabilisé aux ions chlores du béton de sable de concassage de faible (a) et de haute (b) résistance à 28 jours. [7] | 71 |
| Figure 2-59 : Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de soudium (5% Na_2SO_4). [48] | 72 |
| Figure 2-60 : Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de magnésium (5% $MgSO_4$). [48] | 73 |
| Figure 2-61 : Effet des fines calcaires sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression pour des mélanges des BAP à 180 jours. [72] | 73 |
| Figure 2-62 : Absorption d'eau par capillarité des différents mélanges de BAP. [38] | 74 |
| Figure 2-63 : Effet de la teneur des fines sur l'absorption d'eau pour les mélanges de BAP : a) remplacement du SC par LF, b) remplacement du ciment par LF. [72] | 75 |
| Figure 2-64 : Coefficients d'absorption d'eau par capillarité des BAP. [56] | 76 |
| Figure 2-65 : Coefficient d'absorption d'eau par immersion des BAP et BO. [56] | 76 |
| Figure 2-66 : Comparaison de la perméabilité au gaz entre un BAP et BV. [58] | 77 |
| Figure 2-67 : Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants. [74] | 78 |

| | |
|--|----|
| Figure 2-68 : Coefficient de perméabilité des BAP. [56] | 78 |
| Figure 2-69 :Essai de migration des ions de chlorures. [76] | 79 |
| Figure 2-70 : Coefficient de diffusion apparent des bétons étudiés, après 28 jours de cure. [77] | 80 |
| Figure 2-71 : Coefficient de diffusion apparent des bétons étudiés, après 90 jours de cure. [77] | 80 |
| Figure 2-72 : Coefficient de diffusion apparent des bétons étudiés, après 360 jours de cure. [77] | 81 |
| Figure 2-73 :Coefficient de migration des BAP d'ouvrage et des BAP à haute performance. [78] | 81 |
| Figure 2-74 : Variation de la masse après immersion dans la solution de 18 g/l de sulfate de sodium (Na ₂ SO ₄). [79] | 82 |
| Figure 2-75 : La résistance des betons à 28 jours en fonction de leurs porosites. [80] | 83 |

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

| | |
|--|----|
| Figure 3-1 : texture et forme des particules du sable de concassage. [38] | 85 |
| Figure 3-2 : courbe granulo-lazer des fines calcaires. [38] | 86 |
| Figure 3-3 : Cône d'abrams | 89 |
| Figure 3-4 : Essai V-funnel. [38] | 91 |
| Figure 3-5 : Dimensions de la boîte en L | 92 |
| Figure 3-6 : Essai de stabilité au tamis [89] | 93 |
| Figure 3-7 : Rhéomètre HeidolphRZR 2102. [88] | 94 |
| Figure 3-8 : Dispositif de l'essai de compression simple. [82] | 95 |
| Figure 3-9 : Essai de traction par flexion. [38] | 96 |
| Figure 3-10 : Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points. [38] | 96 |
| Figure 3-11 : Essai d'absorption capillaire. | 97 |
| Figure 3-12 : Programme expérimental pour les essais prévus. | 98 |

LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRIVIATIONS

| | |
|---------------------------------|---|
| BAP | Béton autoplacat |
| BAPC | Béton autoplacant à base de calcaire |
| BAPF | Béton autoplaçant à base de filler calcaire |
| BAPR | Béton autoplacant à base de verre |
| BAPS | Béton autoplaçant à base de fumé de silice |
| BAP CV | Béton autoplaçant à base des Cendre volante |
| BAP PZ | Béton autoplaçant à base de Pouzzolane |
| BO | Béton ordinaire |
| BV | Béton vibré |
| C ₃ A | Aluminate tricalcique |
| Ca CO ₃ | Carbonate de calcium |
| CEM I 32.5 | Ciment portland ordinaire à base de classe 32.5 |
| CEM I 42.5 | Ciment portland ordinaire à base de classe 42.5 |
| CEM II 42.5 | Ciment portland composé de classe 42.5 |
| E/C | Eau/Ciment |
| FC | Filler calcaire |
| F/C | Filler / ciment |
| LCPC | Laboratoire central des ponts et chaussés |
| MgSO ₄ | Acide sulfatique |
| Na ₂ SO ₄ | Sulfate de sodium |
| SCC | Self-Compacting Concrete |
| SD | Sable de dune |
| SP | Superplastifiant |

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Il se distingue par une facilité de mise en œuvre, résistance à la compression, durabilité et faible coût. Plusieurs types de béton sont apparus ces dernières années : béton à haute performance (BHP), béton ultra haute performance (BTHP), béton de fibre métallique (BFM), béton autoplaçant (BAP).

Ces derniers sont des bétons très fluides, homogènes et stables qui se caractérisent par sa rapidité de mise en place sous l'effet de son poids propre sans vibration.

La première apparition de ces bétons a été vers les années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores. L'idée de la formulation du BAP est liée à l'observation du comportement de béton sous l'eau en utilisant un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion entre les particules de ciment et un superplastifiant pour assurer la fluidité de ce béton. La formulation de ces bétons a besoin d'une quantité de minéraux remarquable afin d'augmenter le volume de la pâte ainsi que sa fluidité. Par conséquent, il doit y avoir une certaine quantité de fines (particules inférieures à 80 µm) pour obtenir un BAP sans ségrégation et / ou ressuage.

En Algérie ; il existe environ 1010 carrières avec une capacité de production allant de 10 à 400 tonnes par heures et une production totale de 68 millions de tonnes par an. Ces carrières fabriquent 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 les bétons et mortiers, ce qui provoque un problème de stockage au niveau des carrières. La raison principale de la non utilisation de ce sable dans le béton est son taux élevé de fines (éléments inférieurs à 80microns) qui varie de 8 à 30%.

Plusieurs pays dans le monde tels que la France, l'Espagne, l'Angleterre, l'Argentine, le même problème dans certaines régions, et par conséquent des recherches ont été menées pour l'utilisation des sables de carrières dans la confection du mortier et béton. Ces études ont amené ces pays à modifier leurs normes, notamment les taux fines autorisés de 12 à 16 %.

Le but principal de ce travail est la valorisation du sable de concassage de différentes sources dans la confection du béton par l'étude de l'effet des fines calcaires sur les propriétés mécaniques, rhéologiques et la durabilité du BAP.

Notre mémoire est décomposée en trois chapitres dont le premier présente la fabrication des granulats et la valorisation de sable de concassage. Le deuxième est dédié à un aperçu sur le béton autoplacant ainsi qu'une revue bibliographique détaillée sur l'influence du sable de concassage sur les propriétés des mortiers et bétons ordinaires et autoplacants. Dans le dernier chapitre les matériaux et le protocole d'essais utilisés pour réaliser l'étude expérimentale sont présentés.

Enfin, des conclusions générales qui regroupent les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE SABLE DE CONCASSAGE.

1.1 Introduction

La construction des bâtiments, des infrastructures et des ouvrages d'art exige de gros approvisionnement en matériaux. Jusqu'à présent, les sables les plus couramment utilisés pour la confection des bétons sont les sables roulés alluvionnaires. Mais les prélèvements excessifs de ces sables ont fortement contribué à l'épuisement des ressources et ont provoqué des retombées néfastes sur l'environnement.

Le présent chapitre consiste à donner une étude bibliographique sur la fabrication des granulats, ainsi la valorisation de sable de concassage. Enfin l'utilisation de sable de concassage dans la confection du mortier et ou béton autoplacant.

1.2 Fabrication des granulats

1.2.1 Granulats pour mortier et béton

Un granulat est constitué d'un ensemble de grain minéraux, qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm), sont utilisés pour la réalisation des ouvrages de génie civil, de travaux routiers et de bâtiments. Constituent la matière première indispensable à l'industrie de travaux publics et du bâtiment.

Ils sont obtenus :

*En exploitant des gisements de sable et de gravier d'origine alluvionnaire, terrestre ou marine.

*En concassant des roches massives.

*Ou encore par recyclage de produits tels que les bétons de démolition.

Les granulats sont classées en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminé par analyse granulométrique à l'aide de tamis, la masse volumique de granulats doit être de 2000 kg/m³ au minimum [1].

La norme européenne EN 12620 [1] est utilisée pour les granulats utilisés dans le béton. Elle s'applique pour les granulats d'origine naturelle ou artificielle, les granulats recyclés

et les mélanges de granulats fins et gros. Cette norme s'applique également aux fillers inertes (appelés granulats très fins) utilisés dans le béton.

Les caractéristiques des granulats sont divisées en trois groupes important.

Caractéristiques géométriques : (fraction, granularité, forme, teneur en fine, qualité des fines)

Caractéristiques physiques : (résistance à la fragmentation, résistance à l'abrasion, masse volumique absolue et relative, absorption d'eau, résistance au gel/dégel)

Caractéristiques chimiques : (teneur en chlorure, teneur en sulfate, teneur en carbonate)

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être [2] :

Naturel : d'origine minéral, issus de roche meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roche massives (roches éruptives, calcaire.....), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tel que : concassage, broyage, criblage, lavage)

Artificiel : d'origine minéral résultant d'un procédé industriel comprenons par exemple des transformations :

Thermique : sous-produits industriels, granulats réfractaires.

Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisé précédemment dans la construction, tel que les bétons de démolition, de bâtiment ou de structure de chaussée.

1.2.2 Fabrication des granulats dans le monde

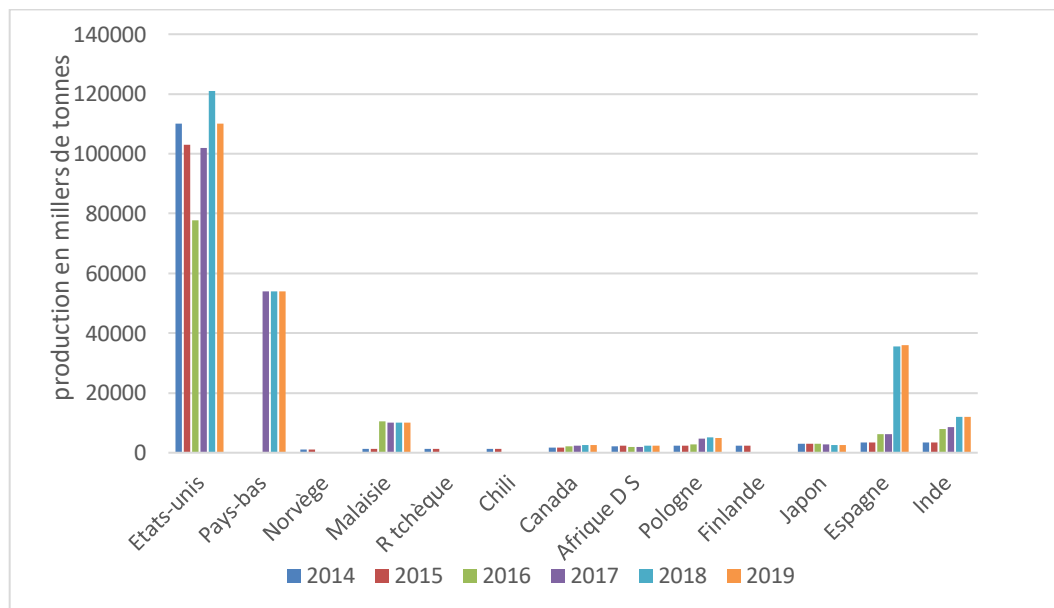
Le granulat est le matériau le plus consommé au monde, c'est la ressource minérale la plus utilisée par un citoyen américain moyen (avec 562 tonnes par personne) [3]. Il représente au minimum 80% du volume de l'ouvrage de génie civil, dont l'importance pour l'aménagement du cadre de vie et le développement économique et culturel n'est plus à démontrer.

Le tableau suivant représente la comparaison entre les pays de l'OCDE et les pays en voie de développement.

Tableau 1-1: Comparaison entre le taux de consommation des granulats [4].

| Pays | l'OCDE | En voie de développement |
|---|--------|--------------------------|
| Taux de consommation par an et personne (tonnes). | 5-8 | 1à2 |

En 2019, le premier producteur estimé était les États-Unis avec plus de 110 millions de tonnes de sable et gravier. Suivi par les Pays-Bas et Norvège avec des quantités produites équivalentes à 54 millions et 14 millions de tonnes respectivement. (Figure 1.1)

**Figure 1-1 :** Production mondiale de sable et de gravier par pays 2014-2019 [5].

1.2.3 Fabrication des granulats en Algérie

Le territoire Algérien compte 1146 exploitations minières en activité dans les 48 wilayas dont 906 exploitations privées et 240 exploitations publiques. . Une lecture des statistiques montre également que les wilayas les plus productrices des agrégats au niveau national sont Bordj Bou Arreridj avec plus de 4,8 millions de m³ , Setif et Mascara plus de 4,4

millions de m³ , Constantine plus de 3,8 millions de m³ , Mila a produit plus de 3,3 millions de m³ , Sidi Bel Abbès, Boumerdes et Ain Defla avec plus de 3,2 millions de m³ . En 9e position se trouve la wilaya de Bouira avec plus de 2,7 millions de m³ suivi de la wilaya d'Oran avec une production de plus de 2,3 millions de m³. Les autres wilayas, soit 38 wilayas, produisent en totalité plus de 19,6 Millions de m³. (Figure 1.2)

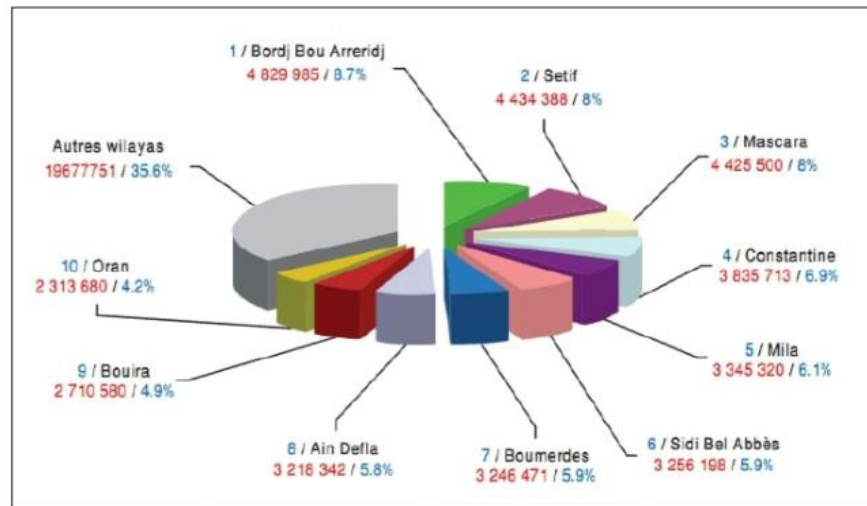


Figure 1-2 : Production des agrégats en m³ année 2009. [6]

Tableau 1-2 : production de sable concassé en 2009

| Wilayas | Production (%) |
|--------------------|----------------|
| Bordj Bou Arreridj | 12,4 |
| Constantine | 11,5 |
| Sétif | 7,2 |
| Oum el Bouaghi | 6,8 |
| Boira | 6,7 |
| Mila | 6,3 |
| Ain Defla | 6 |
| Batna | 5,5 |
| Boumerdes | 5,4 |
| Sidi Bel Abess | 3,9 |

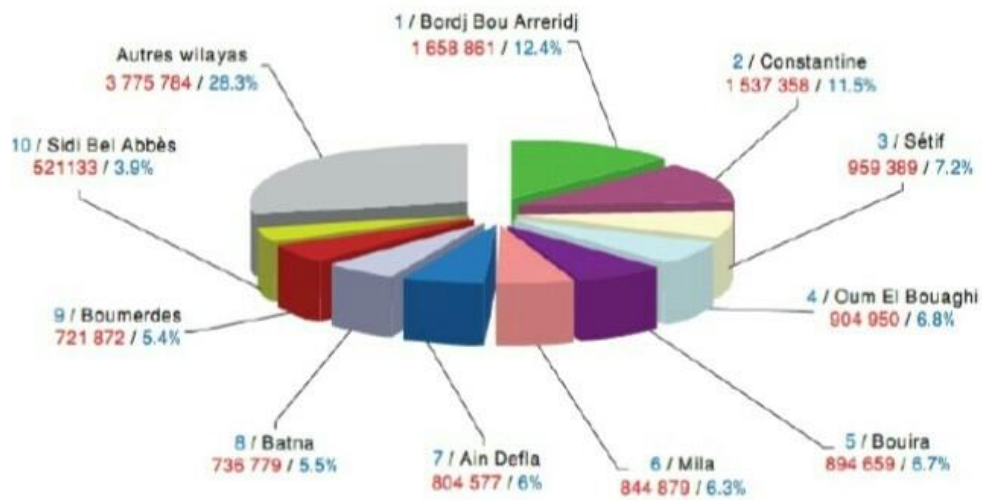


Figure 1-3 : Production de sable concassé m³ année 2009. [6]

1.3 Valorisation de sable de concassage

1.3.1 Caractéristiques de sable de concassage

Les sables concassés, connu aussi sous l'appellation des sables des carrières, 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 préjugé entre 10 et 20 % de fines.

Le sable de concassage est un agrégat de coins cassés. Souvent reconnu leur utilisation dans le béton permet d'obtenir une résistance mécanique plus élevée. Cependant, l'utilisation monte qu'ils nécessitent plus d'eau (efficace) que les granulats roulés.

De plus, l'emploi de ce type de sable montre qu'ils demandent une quantité d'eau plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause de la baisse compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.

Dans le sable de concassage les fines sont généralement probablement la plus petite fraction granulométrique de granulats concassés, alors que dans les sables naturels, les fines peuvent être argile aux autres particules nocives.

L'utilisation des fillers calcaires dans la fabrication des bétons ordinaires reste limitée de 12 à 16 % parce qu'ils augmentent la demande en eau et réduisent concomitamment la résistance.

1.3.2 Avantages et inconvénients de sable de concassage

L'effet de différent teneur des fines calcaire des sables de concassage sur les propriétés du béton à l'état frais et durci ont fait l'objet de plusieurs recherches ces dernières décennies.

Il a été déterminé qu'une quantité de 10% à 15% du calcaire peut être utilisée dans le sable de concassage sans effets nocif sur les propriétés physico-mécanique du béton [7].

Les fines calcaires améliorent l'hydratation des grains de ciment et réduire le temps de prise dans le mortier ; aussi élimine la poussière et le gaspillage des ressources naturelles. Des chercheurs ont constaté que les fines calcaires contenant dans le sable de concassage réduisent le dosage en superplastifiant et augmente la maniabilité des BAP. En outre, ces fines réduisent le cout des BAP et diminuer les problèmes de stockage et d'environnement. Cependant, les fines provenant du concassage des granulats ont une influence positive sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

1.4 Conclusion

La demande croissante envers l'utilisation des granulats s'est accentuer ces dernières années vues les progrès que connait le domaine du génie civil. Cette forte demande a encouragé l'utilisation des matériaux locaux (sable concassé) pour fabriquer des bétons économiques et durables. Nous présenterons dans le chapitre suivant les effets du sable de concassage sur les propriétés des mortiers et béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

CHAPITRE 2 : INFLUENCE DU SABLE DE CONCASSAGE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS ET BETONS AUTOPLACANTS.

2.1 Introduction

Toute activité de production ou de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et a de multiples risques pour la santé.

Pour éviter cette détérioration environnementale causée par ces déchets comme le sable produit par le concassage des roches dans les carrières, on va réutiliser ce sable dans la construction. Ce sable répond aux soucis de manque de sable naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages des poussières de carrières. De même, il apporte par sa composition et sa granulométrie un effet bénéfique aux mortiers et aux bétons.

2.2 Généralités sur les BAP

Le béton Autoplaçant (BAP) par définition, est un béton très fluide, homogène et stable, qui se caractérise par sa rapidité de mise en place sous l'effet de son poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Une caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers. Il a été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980, afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores. L'idée de la formulation du BAP est liée à l'observation du comportement de béton sous l'eau (ouvrages marins) en utilisant un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion entre les particules du ciment et un superplastifiant pour assurer la fluidité de ce béton.

Grace à leur formulation, il offre des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Il présente des résistances et une durabilité analogue à celle des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais.

La rhéologie du béton frais est autant reliée à la composition de la pâte de ciment qu'à celle du mélange de béton lui-même, l'un des avantages des bétons autoplaçants sera d'améliorer la maniabilité du mélange qui peut être évaluée par la mesure du diamètre

d'étalement du béton afin qu'il puisse remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration. En milieu non confiné la mobilité du BAP est décrite par l'essai d'étalement. Par contre la mobilité en milieu confiné est décrite par l'essai de la boîte en L

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Meilleur enrobage des armatures.
- Réalisation de formes complexe.
- Suppression de la vibration : amélioration des conditions de travail des compagnons (santé et sécurité).
- Coulage dans un milieu fortement ferraillés avec une capacité de remplir tous les coins (figure 2.1).



Figure 2-1 : Exemple d'un coulage d'une dalle en béton autoplaçant.

Le béton autoplaçant offre aussi des avantages socio-économiques :

- Diminution de la main d'œuvre nécessaire,
- Dispositifs de vibration non nécessaires,
- Réduction du temps de bétonnage.

2.3 Principaux constituants des BAP

Les constituants utilisés dans la formulation des bétons autoplaçants sont les mêmes pour les bétons ordinaires, mais différents en proportions et en nombre par deux éléments supplémentaires comme il est montré dans la figure 2.2.

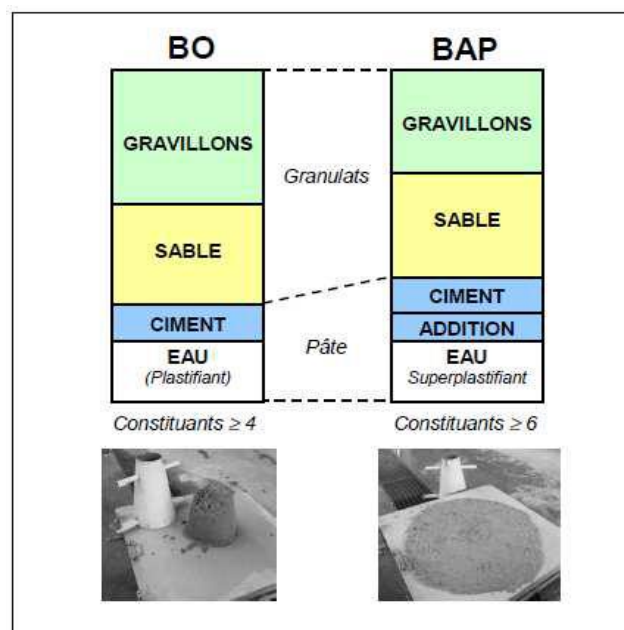


Figure 2-2 : constituants des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants[62].

Toutefois, certains points restent à contrôler dans l'utilisation du BAP: la formulation des BAP implique un dosage délicat des matières premières tel que (ciment, adjuvant et des

différentes additions minérales). Il faut aussi noter l'augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants. La fluidité des BAP nécessite des coffrages étanches, de plus, il y a risque de non compatibilité des matériaux.

2.4 Formulation des BAP

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis.

Nous allons passer en revue les différentes formulations rapportées par dans la littérature.

2.4.1 Méthode japonaise

Méthode japonaise: proposée par Okamura et al [8-14]. Le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide • Le volume du sable est fixé à 40% du volume total du mortier
- L'Optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir (figure2.4)) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône (figure2.3)).

Les auteurs définissent alors deux (2) grandeurs : étalement relatif et vitesse relative kd'écoulement : la fluidité du mortier est donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{h}{h+y} \text{ avec } r_1 \text{ et } r_2 \text{ les diamètres d'étalement selon deux médianes}$$

La viscosité du mortier donnée par : $R_m = 10/t$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en s :

Pour obtenir un béton autoplaçant acceptable, il faut avoir simultanément :

$$\Gamma_m = 5$$

$$R_m = 1s-1$$

Cette méthode est générale et simple. Il faut faire attention aux risques de blocages.

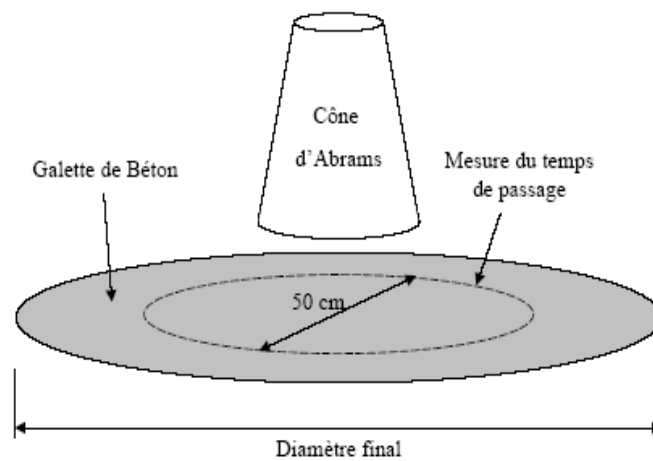


Figure 2-3 : Cône pour mesurer l'étalement des mortiers.

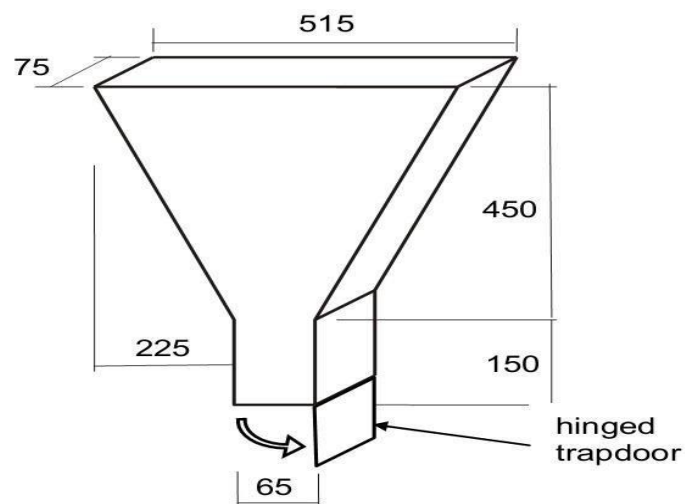


Figure 2-4 : Entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers.

2.4.2 Méthode suédoise :

La méthode suédoise est basée sur le principe de fluidité dans un milieu confiné. En fait ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégré dans le processus de formulation. Ils estiment pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire, mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

2.4.3 Méthode Française (LCPC)

Méthode Française (LCPC): proposée par De Larrard et al. [15 16] au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- La densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- ◆ La proportion du liant est fixée à priori (70% du ciment, 30% d'addition par exemple).
- ◆ Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

- ◆ Le besoin en eau de ce mélange (en présence de superplastifiant) est déterminé.
- ◆ Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104. La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats /phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

2.5 Utilisation de sable de concassage dans la confection du mortier et/ ou béton autoplaçant

L'utilisation des fillers calcaires dans la confection du béton ordinaire reste limitée à cause de l'augmentation de la demande en eau et la réduction de la résistance corrélativement. En effet, dans les bétons autoplaçants, ces fillers peuvent être établis en masse parce que la fluidité est maintenue grâce à l'utilisation d'un superplastifiant.

L'emploi des fines calcaires atteint par des systèmes de filtration des carrières dans les BAP offre une solution économique et environnementale importante [17].

L'utilisation du sable de concassage dans la composition des bétons autoplaçants donne des performances rhéologiques honnêtes lorsque leur composition est conforme. Une teneur élevée en fillers est importante pour évacuer les frottements inter-granulaires, aussi les dosages en eau et en superplastifiant sont recommandés pour éviter le ressuage et la ségrégation.

De plus, ces fines peuvent réduire le coût des bétons autoplaçants et minimiser les problèmes de stockage et d'environnement.[18][19] Cependant, les fillers calcaires être issu de granulats concassés ont une influence positive sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

Une étude a été faite par Felekoglu et al.[20], dont l'objectif de comparé entre un sable pauvre et autre riche en fines dans le béton autoplaçant. Un sable calcaire concassé lavé, sable naturel lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisé pour la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Les résultats trouvés montrent queles BAP formulés avec les sablesconcassés richeen fines, offrir des meilleurs performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression par apport à ceux préparés avec d'autre sable.

Des recherches [21][18] ont prouvé que les fillers calcaires, issus du sable concassé, diminuent le dosage en superplastifiant tout en assurer une fluidité fixé, et donne une maniabilité suffisante des BAP.

El Hilali [22] a montré que l'incorporation de fines calcaires, de bonne surface spécifique de Blaine améliore la fluidité, aussi la compacité des BAP. D'un autre côté, la finesse des fines affects surtout la demande en superplastifiant et participe sur la réduction de l'ouvrabilité des BAP.

Une étude a été administrée au canada[23] , dont l'objectif d'étudier la possibilité d'utiliser les calcaires de carrière pour déployer des BAP économiques. Les résultats trouvés montrent que le remplacement partiel du sable par 50% en masse de fine de carrière réduit le cout des BAP sans aucun effet néfaste sur la résistance à la compression.

2.6 Effet de sable de concassage sur les propriétés des mortiers et béton ordinaire et/ ou autoplaçant à l'état frais

2.6.1 Béton et mortier ordinaire

2.6.1.1 Masse volumique

La masse volumique du béton n'est pas une grandeur stable. Celle-ci varie en fonction de sa masse (ou poids), qui peut elle-même varier considérablement. Ainsi, la formulation du béton (donc son dosage en sable, ciment, eau...) impacte énormément sur sa masse volumique.

Pour le sable de concassage et le sable alluvionnaire la masse volumique apparente augmente légèrement pour un taux de filler de 0 à 6%, et entre 6 et 12% une forte augmentation. Au-delà de 12%, elle commence à se stabiliser comme l'indique la figure 2.5 (Guemmadi)[24].

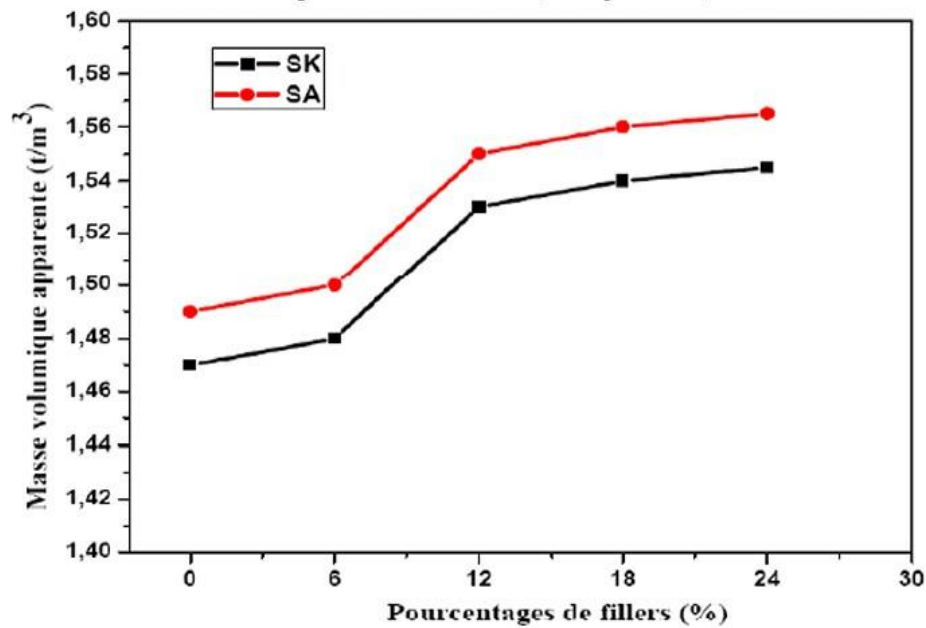


Figure 2-5 : Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines.[24]

Benna et al. [25] a aussi montré que la masse volumique apparente augmente rapidement pour un pourcentage de fines compris entre 0 et 10 % puis s'accroît très faiblement entre 10% et 25%. Il a remarqué que la compacité optimale est obtenue pour des taux de fines allant de 10 à 25% comme illustre la figure 2.6. Ainsi, les fillers calcaires contribuent à densifier la pâte du béton frais en réduisant les pores et modifiant la microstructure.

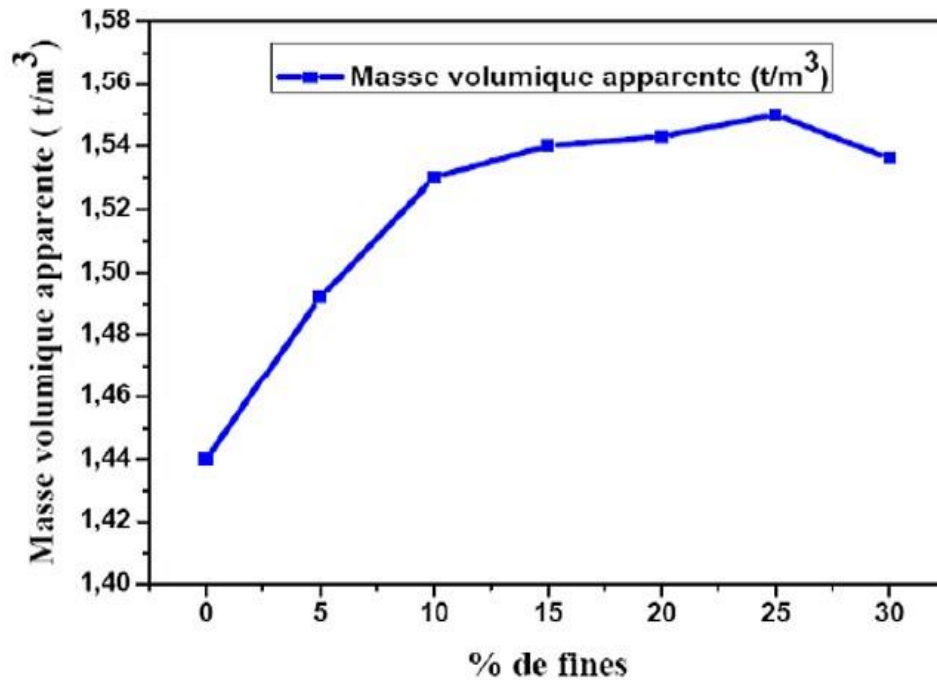


Figure 2-6 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines. [25]

Zaitri et al. [26] ont examiné l'effet des fines calcaires sur la variation de la masse volumique en fonction du temps, ils ont constaté que la masse volumique augmente rapidement pour les taux de fines calcaires allant de 0 à 10 % quel que soit l'âge des éprouvettes et au delà de 10 % elle diminue, cette augmentation est expliquée par le remplissage des fines calcaires qui incorporent dans les vides et les pores capillaires, ce qui diminue la porosité du squelette granulaire du béton. (Fig 2.7)

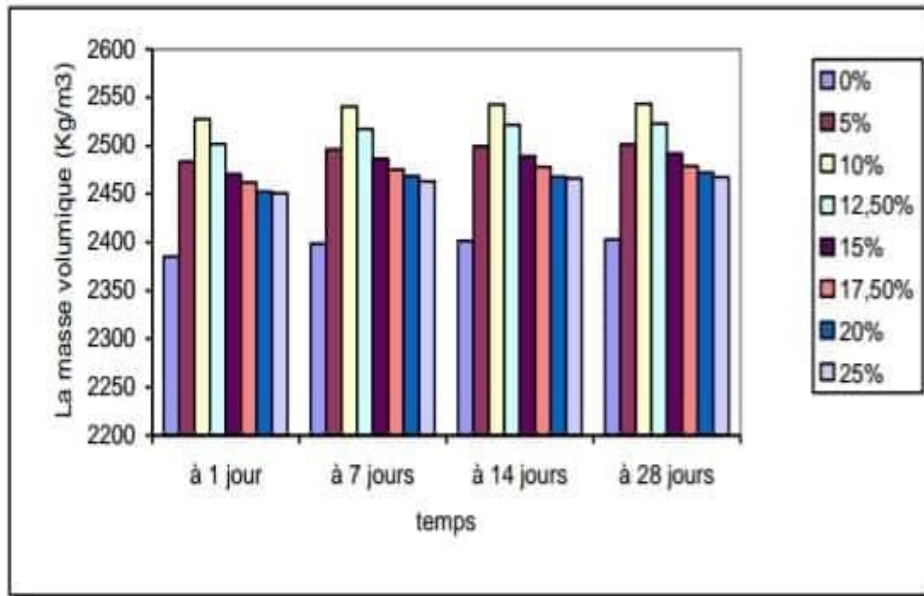


Figure 2-7 : Variation de la masse volumique des bétons ordinaires avec des fines calcaires en fonction du temps. [26]

Chaid et al. [27] Ont montré que la masse volumique du béton avec fines calcaires est plus grande que celle du béton de référence au cours du temps, à cause de la grande finesse du calcaire par rapport au ciment utilisé qui incorpore dans les vides et les pores capillaires et densifie le squelette du béton (fig 2.8).

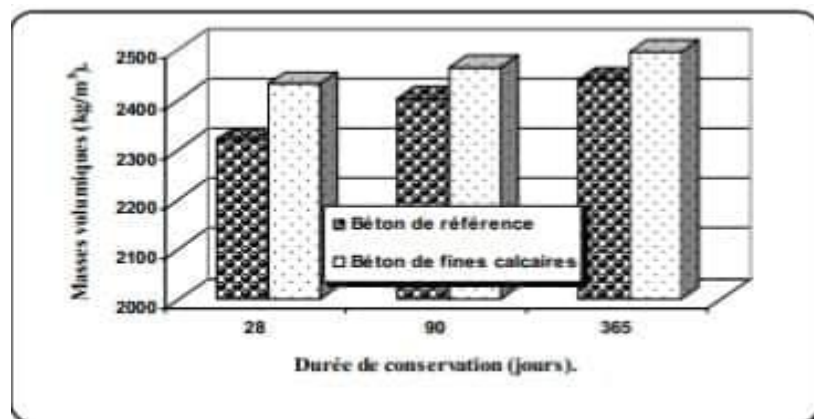


Figure 2-8 : Evolution de la masse volumique des bétons en fonction de la durée de Conservation. [27]

2.6.1.2 L'ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un béton est un facteur important. Elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage ; elle est caractérisée par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (A). L'augmentation de la demande en eau des bétons à base de sable de concassage est l'un des problèmes qui se posent pour l'obtention d'une ouvrabilité suffisante. La diminution de l'ouvrabilité peut être due à la présence élevée des fines, à la forme et à la texture du sable de concassage.

En général, la granulométrie du sable influence la qualité d'eau requise pour la formulation du béton. Cependant, plus la taille des grains d'un sable est petite, plus la quantité d'eau est importante pour la formulation du béton. Autrement dit la classe granulaire d'un sable influe sur l'ouvrabilité d'un béton.

Certaines recherches [28] montrent que grâce à l'incorporation de fines calcaires l'ouvrabilité augmente.

Des recherches ont été fait par Skender [29] dont l'objectif d'étudier l'effet des fines calcaires issus de sable de concassage sur l'ouvrabilité du béton (figure 2.9). Il a utilisé des pourcentages des fines de 0, 5, 15 et 25%. Les résultats montrent que l'ouvrabilité du béton diminue avec l'accroissement du taux de fines calcaires parallèlement du type au ciment utilisé.

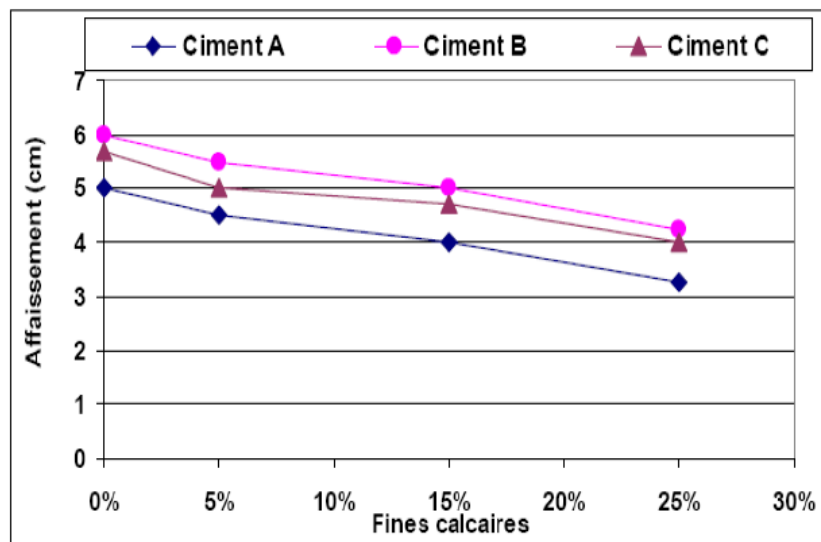


Figure 2-9 : Effets des fines calcaires sur l'affaissement du béton. [29]

Des essais ont été menés par Beixing et al. [7] dont l'objectif d'étudier l'ouvrabilité des bétons sous l'effet des fines calcaires substituées au sable de concassage. Ils ont utilisé deux types de béton : béton de faible résistance ($E/C=0.55$) et un autre de haute résistance ($E/C=0.32$).ont montré que la meilleure ouvrabilité on l'obtient avec des pourcentages des fines calcaires variant de 10 à 15% et de 7 à 10% respectivement. Cependant, ils ont noté que les mélanges de béton avec un rapport E/C de 0.55 présentent une ségrégation.

Les chercheurs [24], ont étudié l'effet des fines calcaires sur les performances du béton, ils ont préparé trois mélanges des bétons avec deux types de fines (calcaire et siliceuse), des taux de fines de 0,5,10, 15 et 20% comme substitution au sable concassé ,un rapport E/C de 0.61, 0.62, 0.64 et 0.66 pour des teneur de fines calcaires respectivement de 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 2.10.

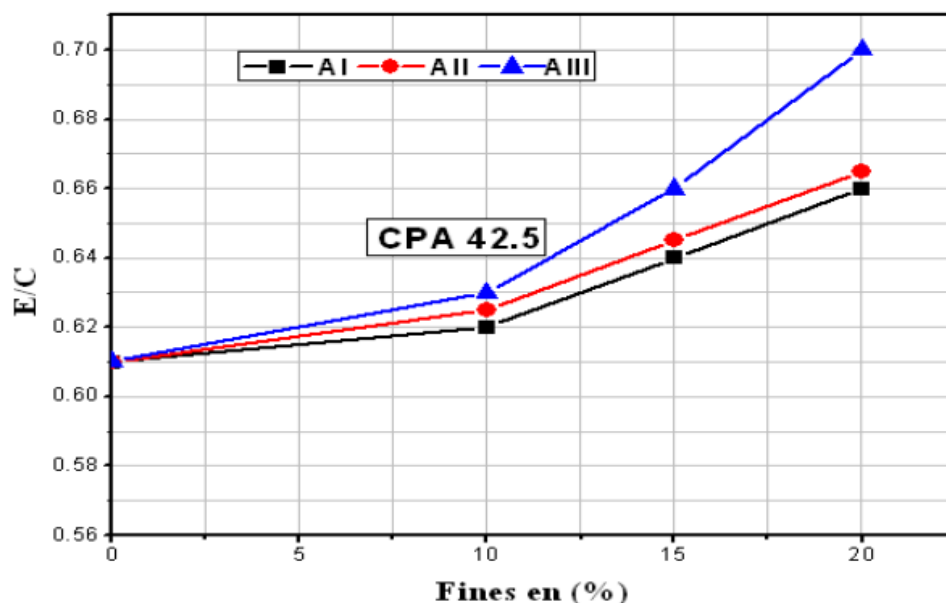


Figure 2-10 : Effet de rapport E/C en fonction de pourcentage de fines. [24]

En effet, cette augmentation de la demande en eau due principalement à l'augmentation de la porosité des bétons avec l'accroissement des fines calcaires, pareillement à la surface spécifique des grains du sable concassé utilisé qui présente des faces fraîchement rompues induisant toujours une porosité systématique donnant lieu à une grande absorption de l'eau.

Des études ont été faites par Bonavetti et al. [30] dont l'objectif d'étudier l'effet des fines substituées au sable concassé sur les propriétés physiques et chimiques des mortiers. Ont été utilisées trois types de fines de nature quartz, calcaire et granite pour un taux de fines variant de 0 à 20%.les résultats montrés que grâce à l'augmentation du pourcentage des fines, la demande en eau augmente dans le mortier. Cependant, cette augmentation est due à la grande surface spécifique des fines. Ils ont obtenu que pour les mortiers avec 5% de fines, l'augmentation de la demande en eau est indifférente (à 2%). De plus, une augmentation rapide de la demande en eau a été observée lorsque le pourcentage des fines est dépassé 10%.les mortiers avec 20 % de fines de granite et calcaire présentent un accroissement de la demande en eau de 17 %.

Zaitri et al. [26] ont constaté que l'affaissement augmente considérablement par rapport au béton de référence (BO 0%) pour les taux de fines calcaires allant de 5% à 10 %. Cela est dû d'une part, à la substitution de la partie fine de sable par les fines calcaires. Donc moins de partie argileuse, qui absorbe beaucoup d'eau, et d'autre part à la finesse du calcaire remplissant les pores et libérant l'eau confiné. Par conséquent un taux de fine au-delà de 10 % le calcaire a une influence négative sur l'affaissement. Cela démontré par la quantité importante du fillers calcaires qui accroît sensiblement la demande en eau. (Fig 2.11).

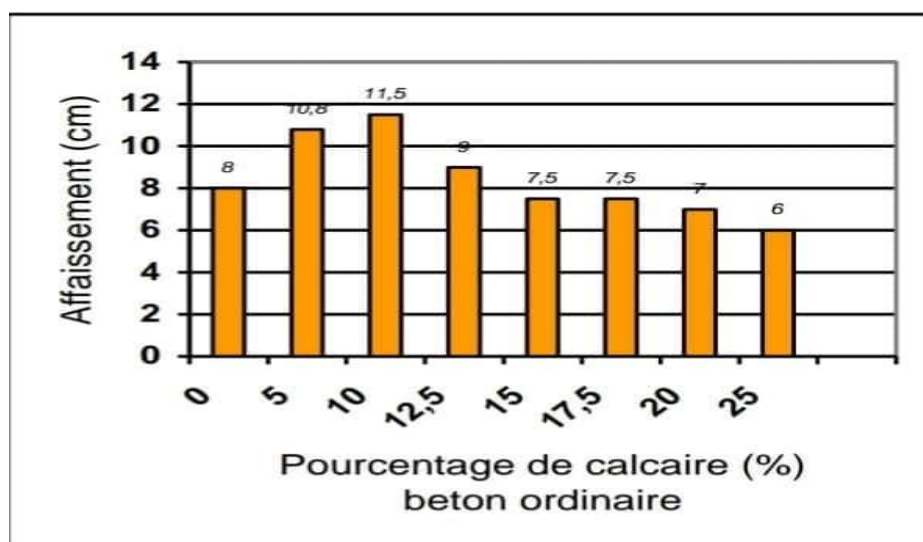


Figure 2-11 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de calcaire. [26]

2.6.1.3 Rhéologie

La rhéologie est une science des déformation et écoulement de la matière, des contrainte, sert à évaluer l'effet des variations des constituants des mélanges à base de ciment sur ses propriétés à l'état frais. En effet, l'interprétation des mesures rhéologiques est corrélativement compliquée, et certains pièges peuvent conduire à des mauvaises conclusions.

Des études ont été faites par Westerholm et al. [31] sur l'influence des fines sur les propriétés rhéologiques. Les résultats trouvés montrent que le taux élevé de fine influe sur la rhéologie de mortier. Aussi, il augmente le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

D'autres chercheurs ont trouvés que les paramètres rhéologiques des mortiers à base de sable de concassage ont été légèrement plus élevés et dans certains cas plus important au mortier correspondant avec sable naturel.

Westerholm et al. [31] ont étudié l'effet des fines calcaires sur les caractéristiques rhéologiques des mortiers. Les résultats montrent que la contrainte du seuil de cisaillement des mortiers augmente pareillement à partir des taux de fines supérieurs à 16% comme indique la figure (2.12.a). Par conséquent, la demande en eau augmente dans la variation de la surface totale des agrégats fins. La figure (2.12.b) illustre que la relation entre la teneur en fines et la viscosité plastique des mortiers est plus compliquée.

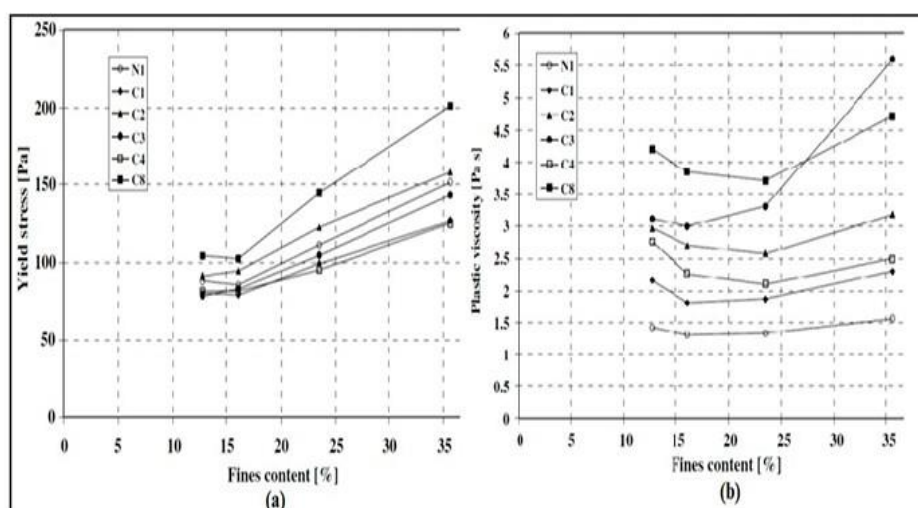


Figure 2-12 : Evolution a) du seuil de cisaillement et b) de la viscosité en fonction de la teneur en fines dans le sable. [31]

Saffidine [32] a étudié l'effet de la concentration volumique solide des coulis de ciment sur l'évolution de seuil de cisaillement (fig 2.13).

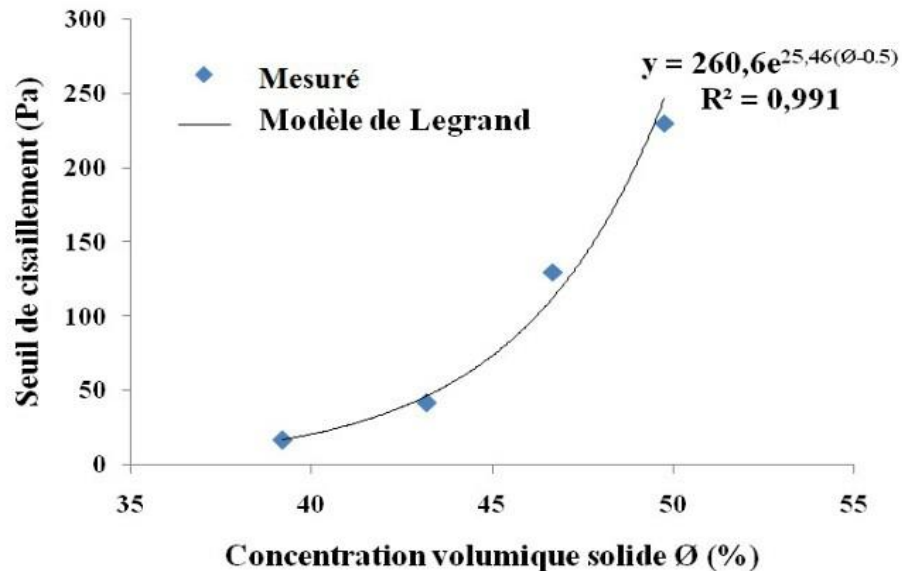


Figure 2-13 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide des coulis de ciment sans Sp - Modèle de Legrand – [32]

Il a illustré que l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique solide suit une loi de type exponentiel. La contrainte seuil augmente d'une façon remarquable avec l'accroissement de l'ajout des fines calcaires de concassage. Donc, la contrainte seuil est liée au potentielle d'interaction physico-chimique des particules de ciment et de fine calcaire. Aussi, a dit que l'ajout des fines provoque un accroissement de la surface spécifique, ce qui augmente aussi le frottement interne. Tous ces résultats causés par l'accroissement de l'énergie minimal qu'on doit apporter pour détruire le potentiel d'interaction physico-chimique des particules.

Soualhi et al. [33] ont examiné l'effet des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques de béton, les résultats trouvés montrent que la viscosité plastique du béton augmente avec l'augmentation du taux de substitution des fines calcaires, aussi le dosage de saturation des

fines calcaires est d'environ 30%. En effet, Benaïcha et al [34]. Ont constaté que la substitution du ciment ($475 \text{ m}^2/\text{kg}$) par les fillers calcaires ($555 \text{ m}^2/\text{kg}$) influe positivement sur la fluidité du coulis, en diminuant son temps d'écoulement et sa viscosité.

Adjoudj et al. [35] ont étudié l'effet des fillers calcaires sur la rhéologie du mortier pour des types et dosages de super plastifiant différent, les résultats trouvés montrent que le seuil de cisaillement diminue linéairement avec et sans super plastifiant, aussi observent que le seuil de cisaillement diminue légèrement lorsque le calcaire est combiné avec le super plastifiant ou le PC semble être plus compatible. Cependant, le LS engendre une baisse monotone avec son dosage (fig 2.14).

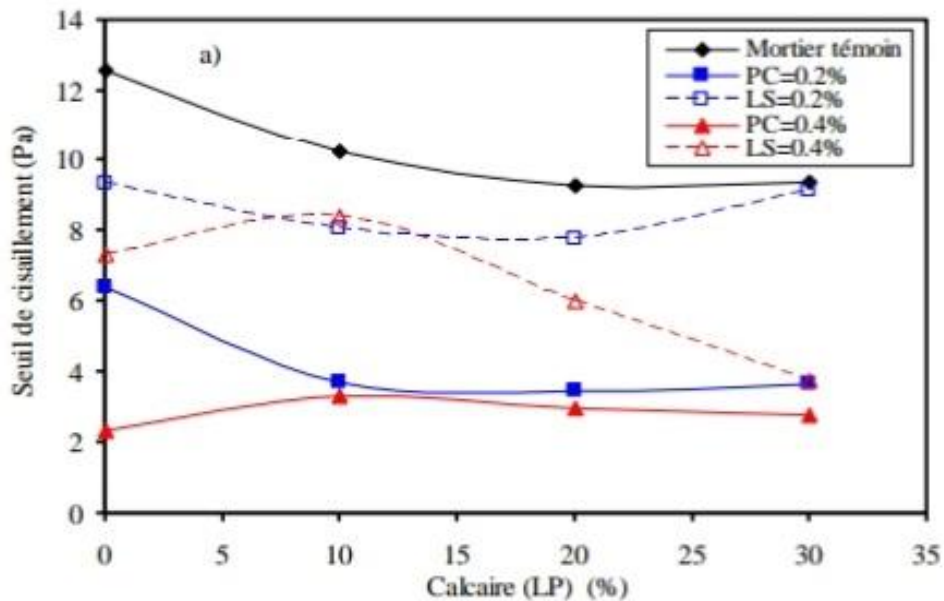


Figure 2-14 : Variation du seuil de cisaillement des mortiers au calcaire pour différents types et dosages en superplastifiant. [35]

Et pour la viscosité plastique, ils ont trouvé une amélioration avec un taux de fine de 10 % mais d'une façon plus significatif pour le LS lorsque ce seuil est dépassé, aussi constatent que le calcaire n'as aucun effet significatif sur la viscosité plastique pour les deux types de super plastifiant donnant des courbes horizontales (fig 2.15).

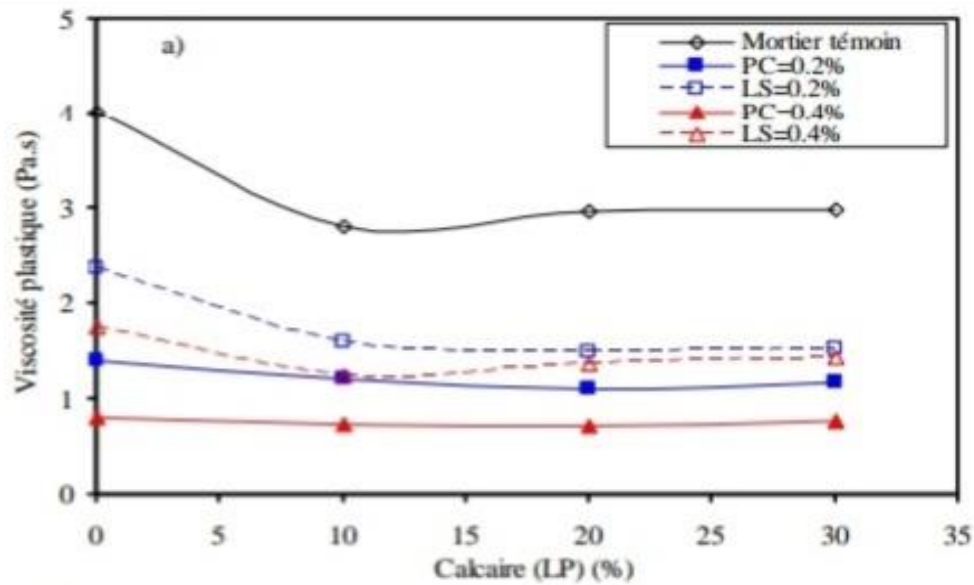


Figure 2-15 : Variation de la viscosité plastique des mortiers au calcaire pour différents types et dosages en superplastifiant. [35]

2.6.2 Béton et mortier autoplaçant

2.6.2.1 Masse volumique

Mongi et al. [36] ont trouvé que la masse volumique augmente avec l'ajout de fillers, jusqu'à atteindre un optimum au-delà duquel elle diminue. Pour les bétons courants, cet optimum est atteint pour les mélanges réalisés avec le sable à 12 % de fines et pour les trois affaissements considérés. Pour les bétons à superplastifiant, il est obtenu avec le sable à 6% de fines et pour les deux affaissements étudiés. La variation de cette propriété est plus conséquente pour les mélanges à superplastifiant. (Fig 2.16 ; 2.17)

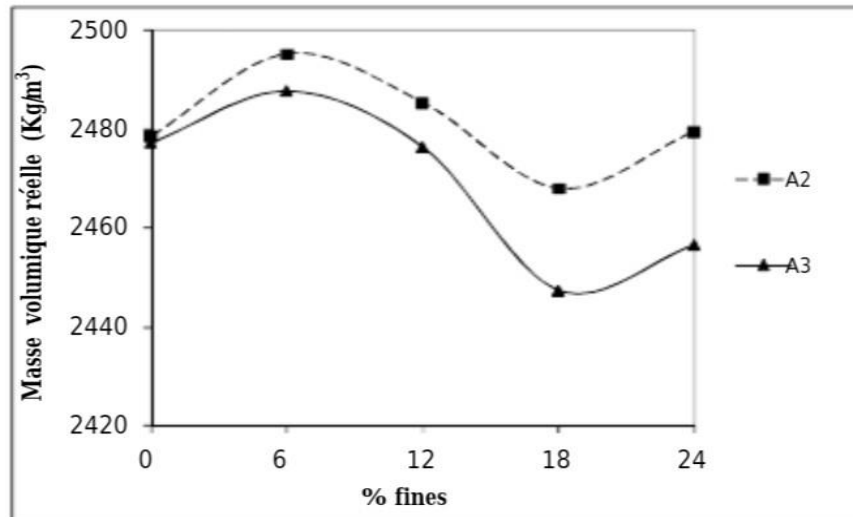


Figure 2-16 : Masses volumiques réelles des bétons à superplastifiant. [36]

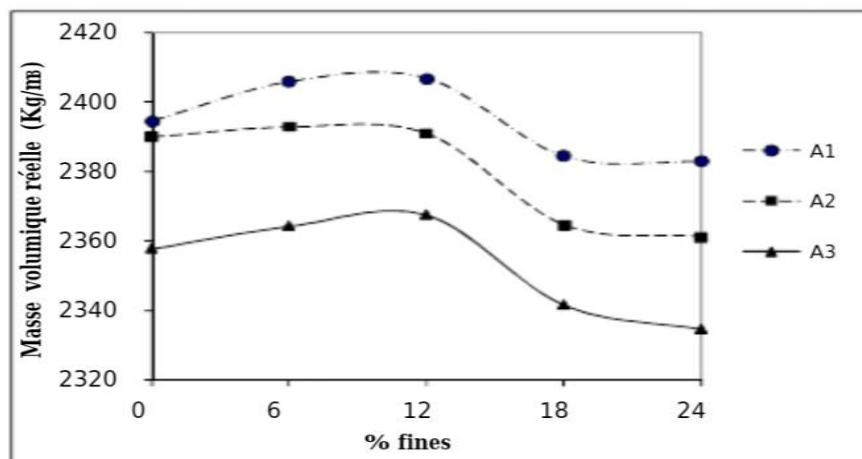


Figure 2-17 : Masses volumiques réelles des bétons courants.[36]

Meziani et al. [37] ont observé une baisse de la masse volumique des bétons à 24h. Suite à l'évaporation de l'eau des matériaux en contact avec l'air ambiant. La figure montre que les masses volumique des bétons augmentent en fonction du temps (42h, 7, 28, 90,180 jours). C'est du à l'hydratation continue des grains de ciment qui ne s'arrête jamais. on comparant la masse volumique du béton autoplaçant à base de microsilice (BAPS) avec un BAP à base de filler calcaire(BAPF), on trouve que celle du BAPS est supérieur de BAPF. En effet, la teneur en air occlus de ce béton relativement importante par rapport au BAPS

lui a conféré une compacité moindre, par conséquent, une pénétration facile de l'eau à l'intérieure des pores qui engendre, par la suite, une augmentation de sa masse. (Fig 2.18).

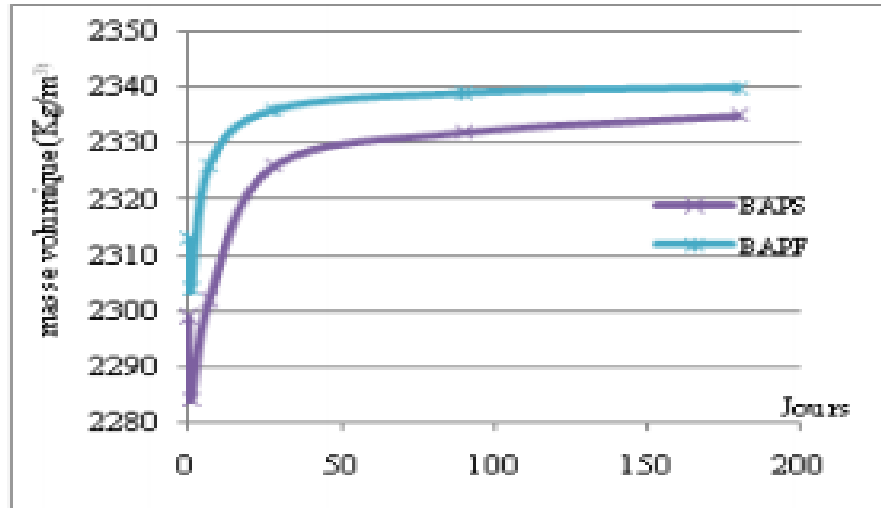


Figure 2-18 : Masses volumiques des bétons. [37]

2.6.2.2 L'ouvrabilité

Benyamina [38] a examiné l'étalement et le temps d'écoulement du BAP, il a préparé cinq mélange de BAP avec et sans fines calcaires comme illustre la figure 2.19, il montre que l'augmentation de la teneur en fines calcaires contribue a une diminution de l'étalement et une augmentation du temps d'écoulement, aussi constate que le meilleure étalement et le plus long temps d'écoulement en V-funnel pour le BAP avec 15 % de fines calcaires, cette diminution d'étalement est expliqué par l'augmentation de la demande en eau pour les mélanges contenant des fines calcaires .

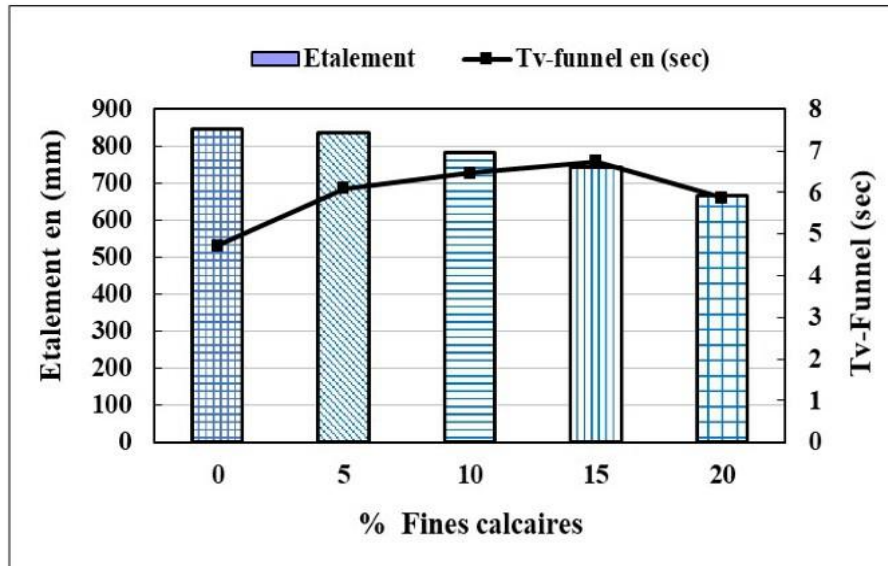


Figure 2-19 : Etalement, temps d'écoulement Tv-funnel en fonction de la teneur en fines de calcaire. [38]

AZRAR et al. [39] ont étudié l'écoulement de MAP en fonction de pourcentage de fine, les résultats trouvés montrent que le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation de dosage des fines calcaires, ils constatent que cette diminution est due à la présence du superplastifiant qui joue le rôle de fluidifiant et aussi l'ajout des fines calcaires qui diminue les frottements inter-granulaires, et donc augmente la fluidité et réduit le temps d'écoulement. (Fig 2.20).

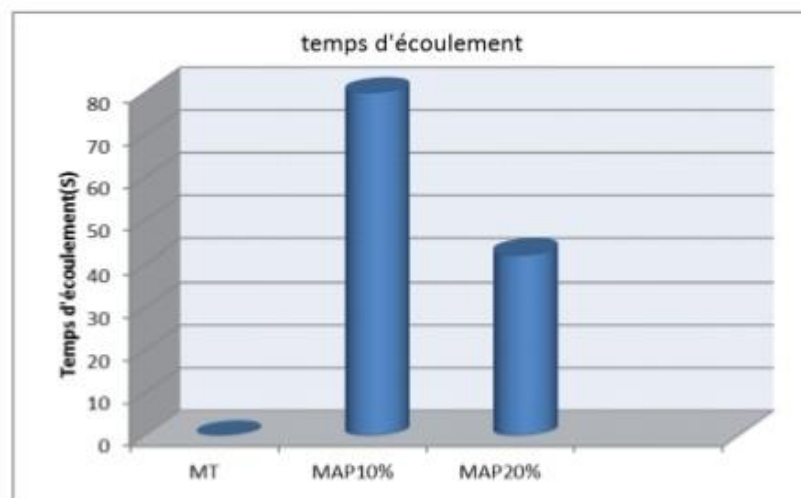


Figure 2-20 : Histogramme des temps d'écoulement des trois mortiers élaborés. [39]

N. Bouhamou et al.[40] ont examiné l'influence du rapport filler/ciment sur la fluidité du béton autoplacant avec un rapport E/C et un volume de pâte constant (figure 2.21), ils constatent que le filler calcaire influe faiblement sur la demande en eau, aussi que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation du rapport F/C et une légère diminution de la viscosité, ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à dosage élevé dans la formulation des BAP.

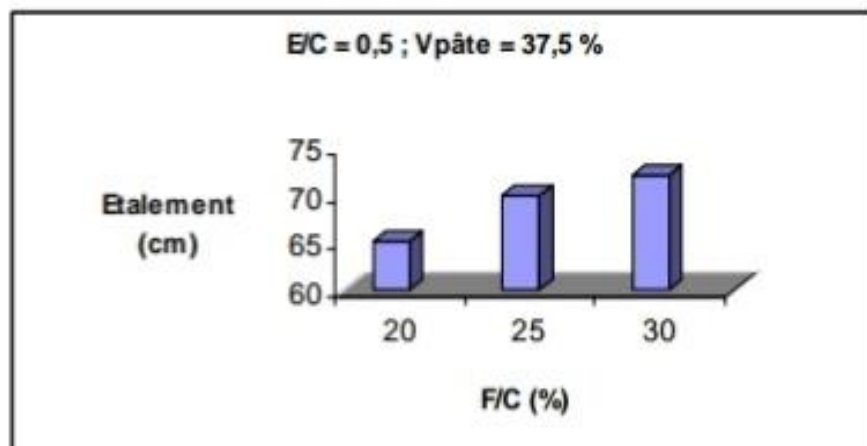


Figure 2-21 : Influence de la variation du rapport F/C sur le diamètre d'étalement.[40]

2.6.2.3 Rhéologie

Benyamina et al. [38] a été étudié la relation entre la contrainte de cisaillement et l'étalement du BAP en fonction de la teneur en fines calcaires, il a trouvé que l'accroissement du pourcentage des fines diminue l'étalement et augmente le seuil de cisaillement, aussi cette augmentation est expliquée par la grande finesse des fines calcaires qui donne une augmentation de la demande en eau. (Figure 2.22)

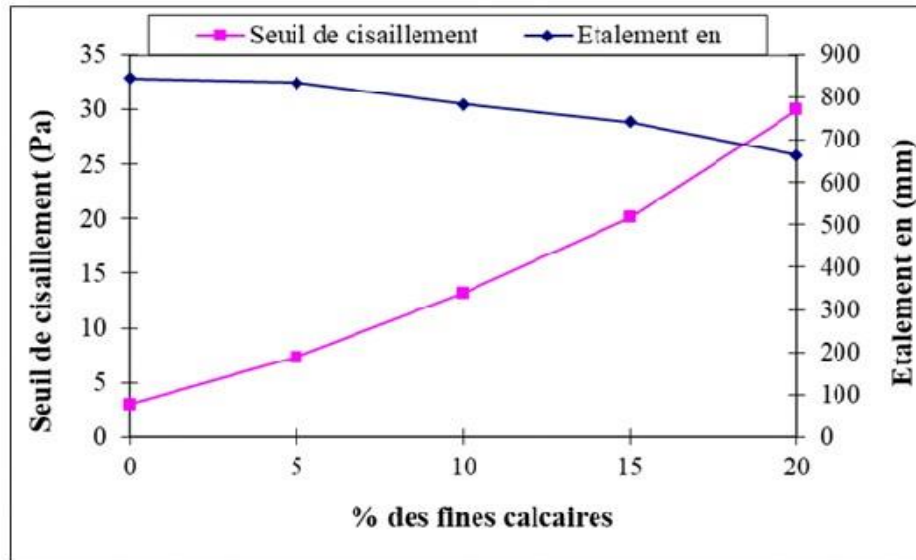


Figure 2-22 : Relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement en fonction des fines calcaires. [38]

Aussi benyamina a fait une corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement ,il a montré que il ya une diminution de l'étalement mesuré avec l'augmentation du seuil de cisaillement des m élanges des BAP comme illustre la(figure 2.23)

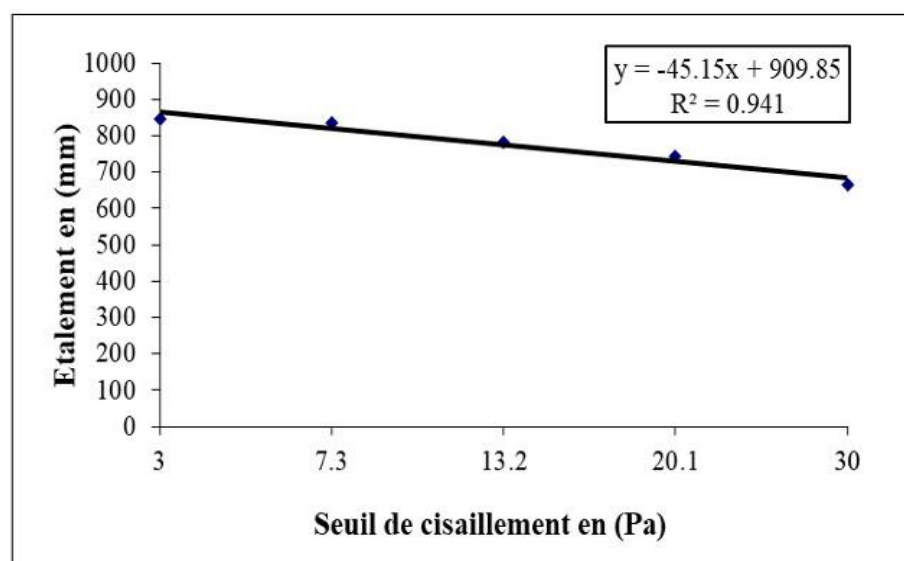


Figure 2-23 : Corrélation entre l'étalement et le seuil de cisaillement. [38]

Une étude faite par benyamina [38] sur la variation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement Tv-funnel du BAP en fonction de la teneur en fines, il montre que pour le taux des fines de 0 à 15 % la viscosité plastique et le temps d'écoulement augmente, mais de 15 % à 20 % des fines donne une augmentation de la viscosité et une diminution de temps d'écoulement comme montre (la figure 2.24).

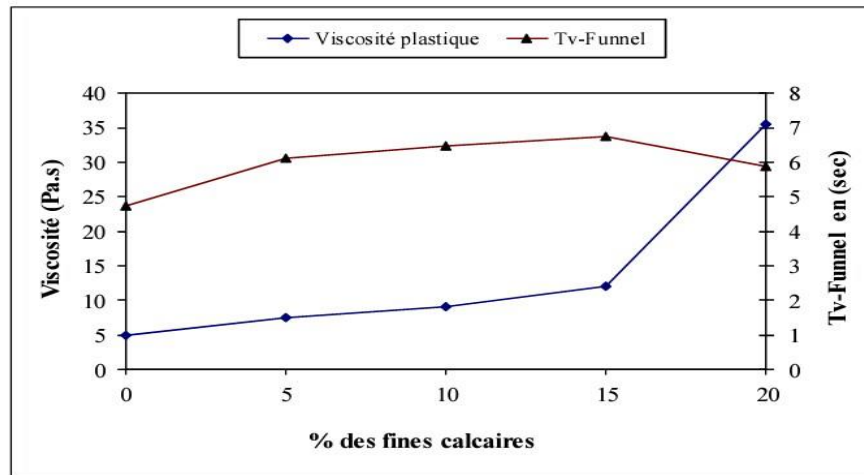


Figure 2-24 : Variation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement Tv-Funnel .

[38]

Aussi a fait une corrélation entre la viscosité plastique et le temps d'écoulement du BAP , il observe une relation exceptionnelle entre le temps d'écoulement Tv-funnel et la viscosité plastique avec un bon module de corrélation ($R^2 = 0.97$). (figure 2.25)

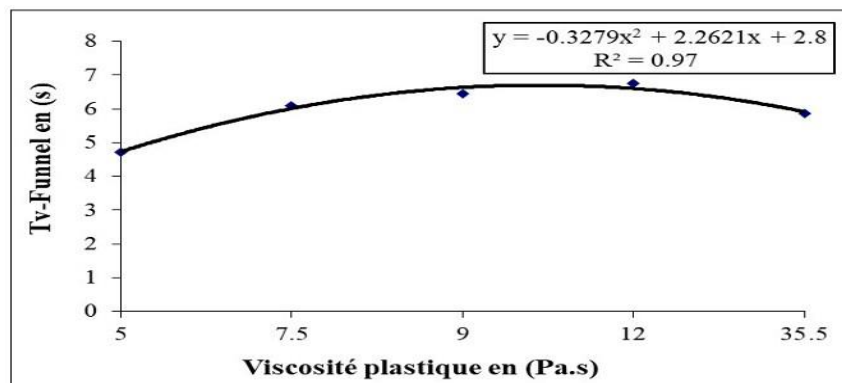


Figure 2-25 : Corrélation entre temps d'écoulement et viscosité plastique du BAP. [38]

Bouhamou et al. [40] ont constaté que l'ajout de fillers calcaires contribuent à une diminution de la viscosité du BAP, par conséquent, une augmentation du diamètre d'étalement, mais lorsque le dosage de fillers calcaires dépasse les 25 %, il provoque une augmentation de la viscosité se traduisant par une diminution de taux de remplissage.

Behim et al.[41] ont trouvé que l'augmentation de la viscosité est suite à l'augmentation des dosages en addition. Ceci résultant de l'augmentation de la viscosité. Le seuil de cisaillement ne devrait pas dépasser une certaine limite qui pourrait se traduire par une résistance à la ségrégation entraînant le blocage des gros granulats par raidissement de la pâte. (Fig 2.26).

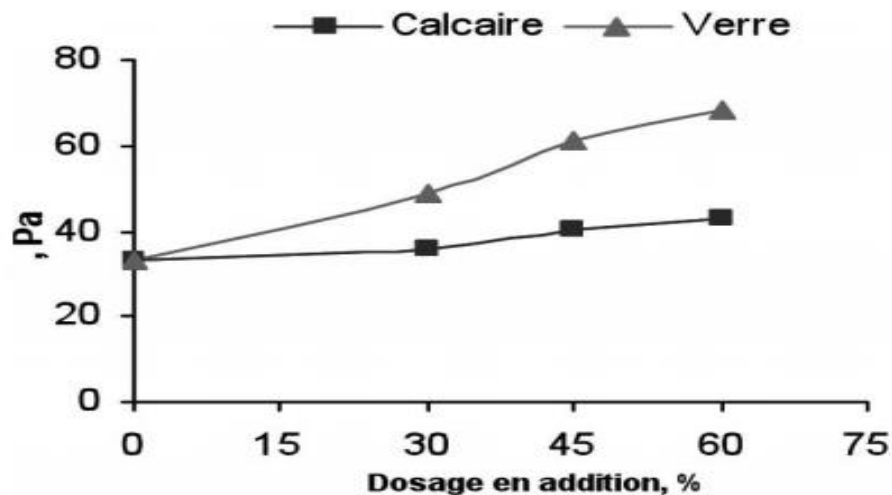


Figure 2-26 : Effet des additions sur le seuil de cisaillement. [41]

Par référence au graphe on conclue que la viscosité des BAPC et BAPV est proportionnelle avec le dosage des poudre de calcaire et de verre pendant une langue duret

Il est à noté que l'écoulement du BAPR à faible viscosité est très rapide puis s'arrête. (Figure 2.27)

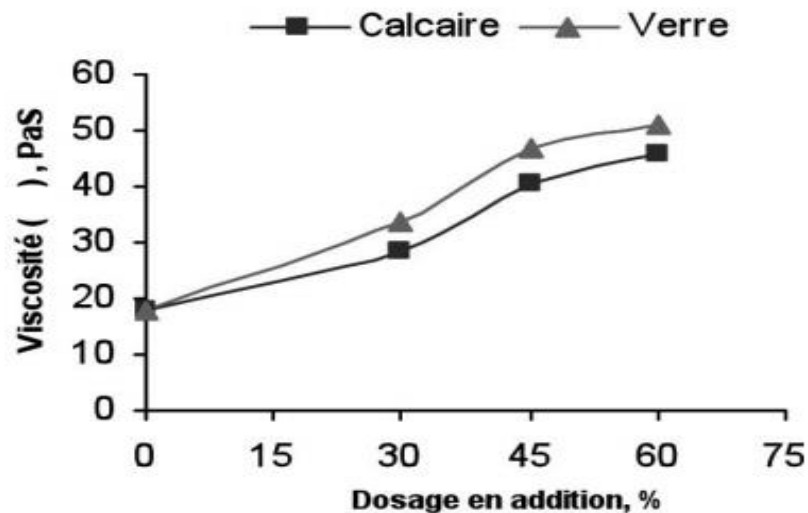


Figure 2-27 : Effet des additions sur la viscosité des BAP. [41]

2.7 Effet de sable de concassage sur les propriétés mécaniques et durabilité des mortiers et bétons ordinaire et/ ou autoplaçant

2.7.1 Mortier et béton ordinaire

2.7.1.1 Résistance à la compression

Des chercheurs ont étudié l'effet de fines calcaires dans le sable de concassage sur la résistance à la compression des mortiers. trois types de ciment ont été utilisés avec des pourcentages de fines calcaires de 0, 5, 10, 15 et 20% et un rapport E/C de 0,55, ils 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 (Khatib et al.)[42]. 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.

Menadi [43] a aussi étudié l'évolution de la résistance à la compression des mortiers et bétons par rapport au pourcentage de fines substitués au sable de concassage. Il a utilisé quatre types de ciment : ciment (A) de type CEM I 32.5, ciment (B) de type CEM I 42.5, ciment (C) et ciment (D) de types CEM II 42.5/A-L. Il a constaté que la résistance à la

compression des mortiers augmente avec l'âge pour les mortiers avec et sans fines. En effet, cette augmentation est due au développement de l'hydratation du ciment.

Kenai et al. [44] ont trouvé que l'ajout de fines calcaires au sable de concassage jusqu'à 10% n'affecte pas sur la résistance à la compression du mortier, mais par contre, au delà de 10% jusqu'à 20% la résistance à la compression diminue. Des essais ont été faits par Benachour et al. [45] dont l'objectif d'étudié l'effet des fines calcaires sur l'évolution de la résistance à la compression à différents âges, les résultats trouvés montrent que la résistance à la compression augmente au jeune âge à cause de l'augmentation des fines de 0 à 15%. Cette augmentation est due à la surface rugueuse du sable de concassage et à la réaction des fillers calcaires (CaCO_3) avec le C3A du ciment. Au-delà du taux de 15% de fines, la résistance à la compression diminue légèrement jusqu'à 20% de fines et devient comparable à celle du béton de référence (Benachour et al.) (figure 2.28).

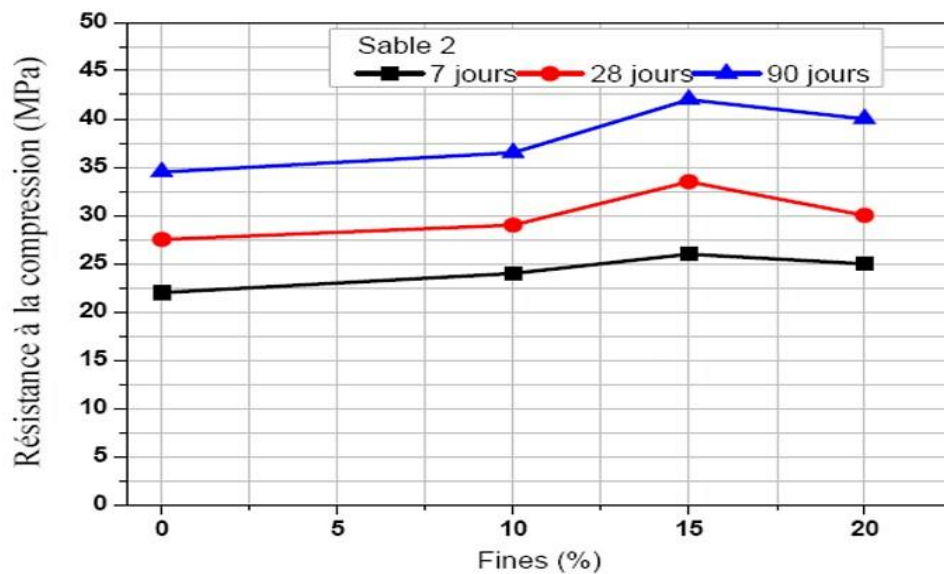


Figure 2-28 : Développement de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires. [45]

Zaitri et al. [26] ont étudié la résistance à la compression des bétons ordinaires avec des âges différents en fonction de taux de calcaire, ils constatent que la résistance à la compression augmente avec l'âge pour les taux de fine de 0 % à 10 % et au delà de 10 % la résistance diminue comme montre la figure 2.29.

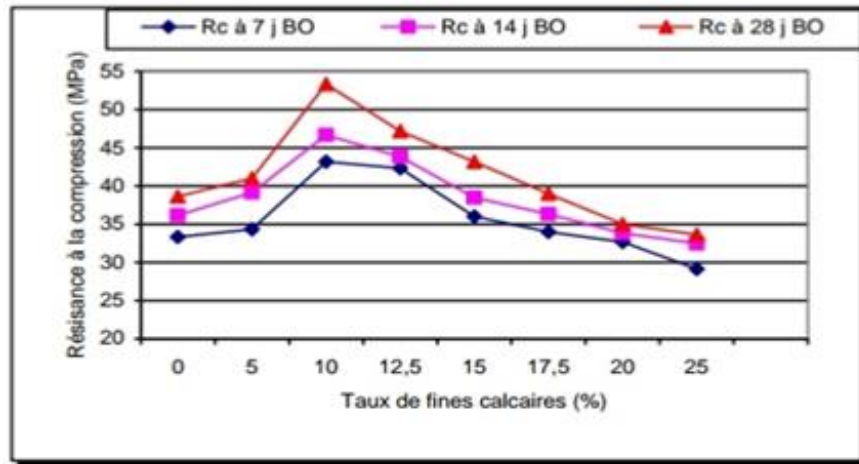


Figure 2-29 : Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux De calcaire. [26]

Des recherches ont été menées par chaid et al [27]. Sur l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de conservation pour un béton avec fines calcaires et autre sans fines, il constate que les résistances en compression du béton aux fines calcaires sont supérieures à celles du béton de référence comme illustre la figure 2.30.

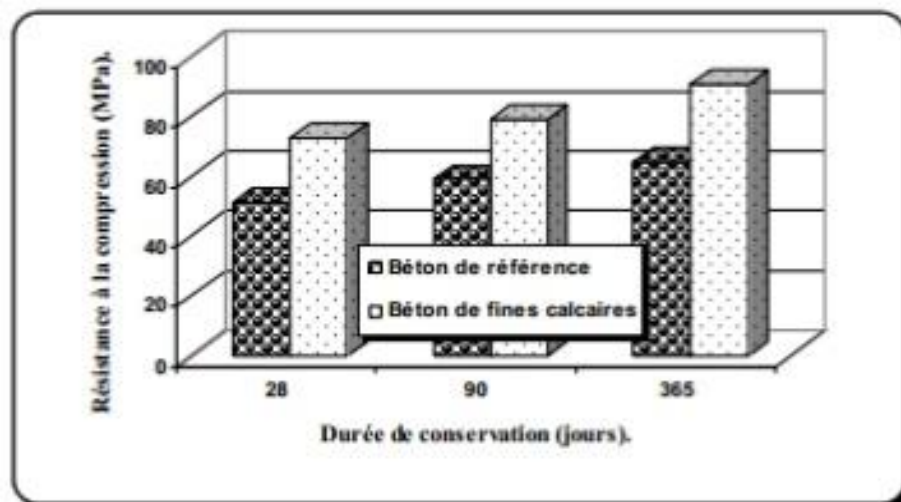


Figure 2-30 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la durée de conservation pour les éprouvettes conservées dans l'eau de mer. [27]

2.7.1.2 Résistance à la flexion

Menadi [43] a montré que pour les mortiers contenant des fines calcaires et ciment, la résistance augmente par rapport au mortier de référence.

Benna [25] montre que la résistance à la traction par flexion des bétons et mortiers diminue avec l'accroissement des fines comme illustre (la figure 2.31)

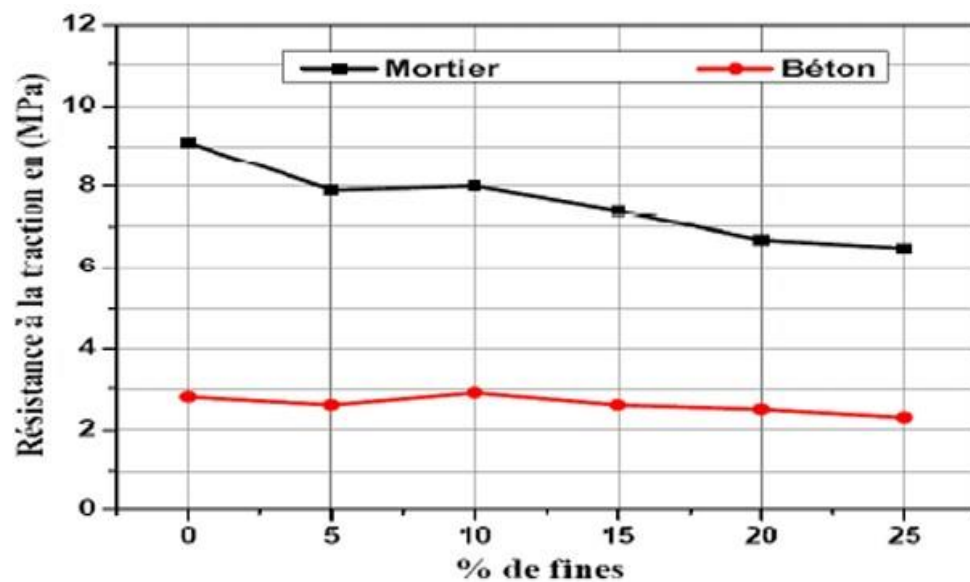


Figure 2-31 : Résistance à la traction par flexion des mortiers et bétons en fonction de pourcentage de fines (benna). [25]

D'autres [46] ont montré que l'ajout des fines calcaires aux mortiers et aux bétons crée une chute de résistance à la flexion comme illustre la figure 2.32.

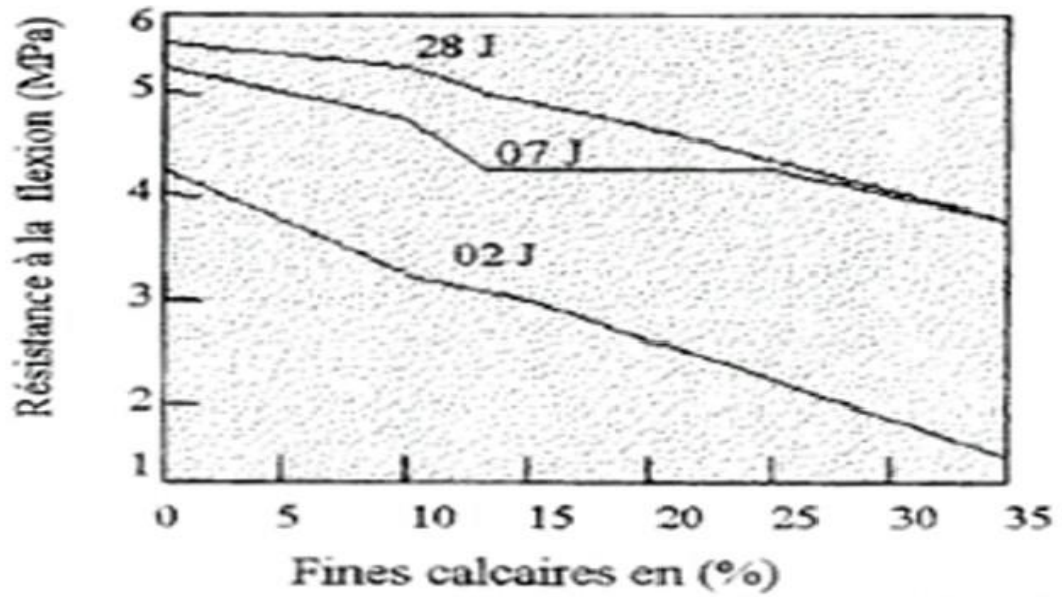


Figure 2-32 : Résistance à la flexion en filler calcaire. [46]

Maldji [47] a étudié la variation de la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours en fonction du mode d'introduction des fillers calcaire, les résultats trouvés montrent que la résistance à la flexion est légèrement faible pour le mode de substitution (figure 2.33).

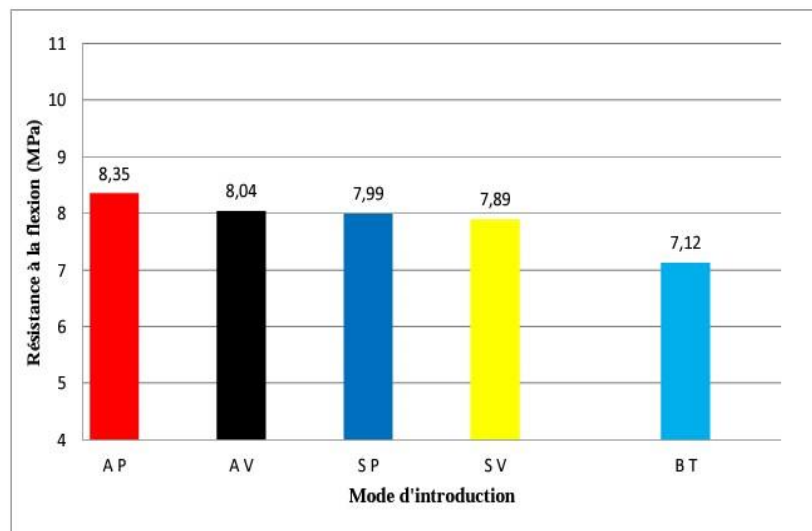


Figure 2-33 : Variation de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction du mode d'incorporation des fillers calcaires.[47]

Des recherches ont été menées par Amouri et al.[48] dont l'objectif d'étudier l'effet de taux de substitution sur la résistance à la flexion avec le temps (figure 2.34), les résultats trouvés montrent que la résistance au mortier avec filler calcaire augmente aux différentes échéances.

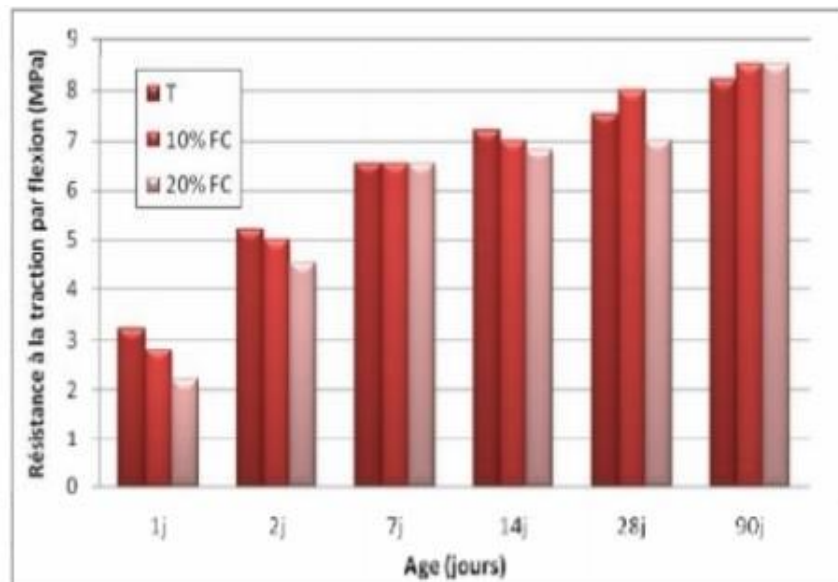


Figure 2-34 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge pour les deux taux de substitutions de filler calcaire.[48]

2.7.1.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité dépend immédiatement des proportions volumiques de ses constituants.

Hebbouche [49] fait des recherches, il a trouvé que le module d'élasticité de béton est influencé par les fillers contenues dans le sable concassé d'une façon équivalente à celle des résistances mécaniques. Il constate que grâce à l'ajout de fillers calcaires jusqu'à 15 % de fines le module d'élasticité augmente.

D'après Donza et al. [50] le module d'élasticité est diminué au jeune âge, quel que soit l'origine des fines.

Benachour et al.[45] ont étudié l'évolution de modules d'élasticité en fonction de pourcentage de filler, ils ont trouvé une léger diminution du module de Young à des pourcentages de fines élevés comme illustre la (figure 2.35).

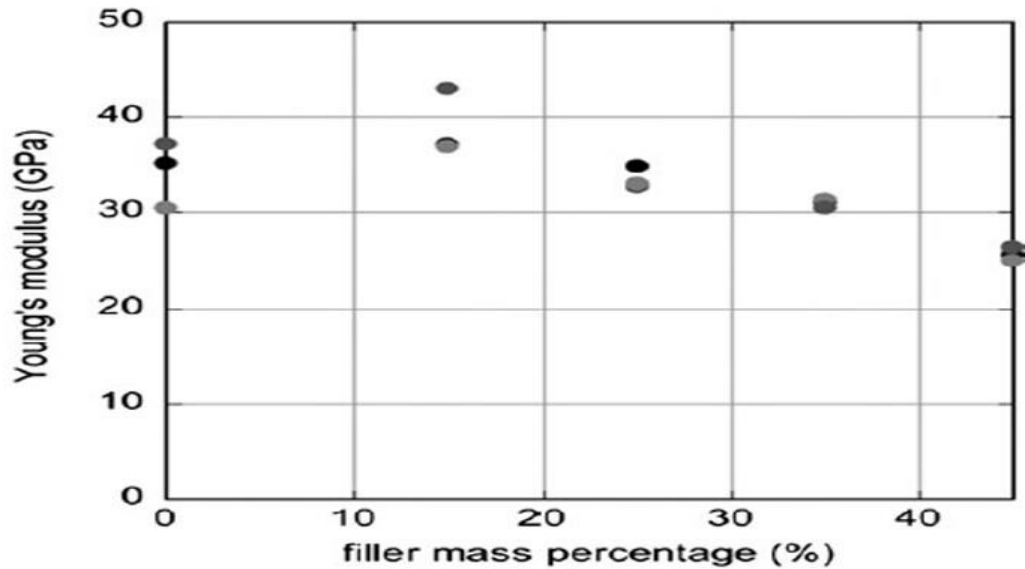


Figure 2-35 : Evolution de modules de Young en fonction de pourcentage de filler. [45]

D'autres études [51] ont éprouvé que lorsque la résistance est constante, le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne distinct pas de ceux de béton ordinaire

2.7.1.4 Le retrait

Le retrait du béton est une déformation volumique de celui-ci sous l'action de phénomènes physico-chimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. Etant donné que le taux d'humidité relative du béton coulé s'élève initialement à 100 % et que le milieu ambiant est généralement caractérisé par une humidité relative plus faible (1) plusieurs chercheur on étudier la durabilité de béton et mortier à base de sable de concassage, plus précisément l'effet des ajouts de calcaire sue le retrait. La formation des carboaluminates causée par la présence des fines dans le sable entraine une augmentation du retrait (Kkatib et al.) [42]. Un mortier contenant 15% de fines calcaires présente un retrait de séchage plus élevé à tous les âges [43]. (Hebbouche) [49] a trouvé que le béton à base de concassage qui contient près de 20% de fines a un retrait plus remarquable par rapport à les autres pourcentages ce qui est montré par la figure 2.36.

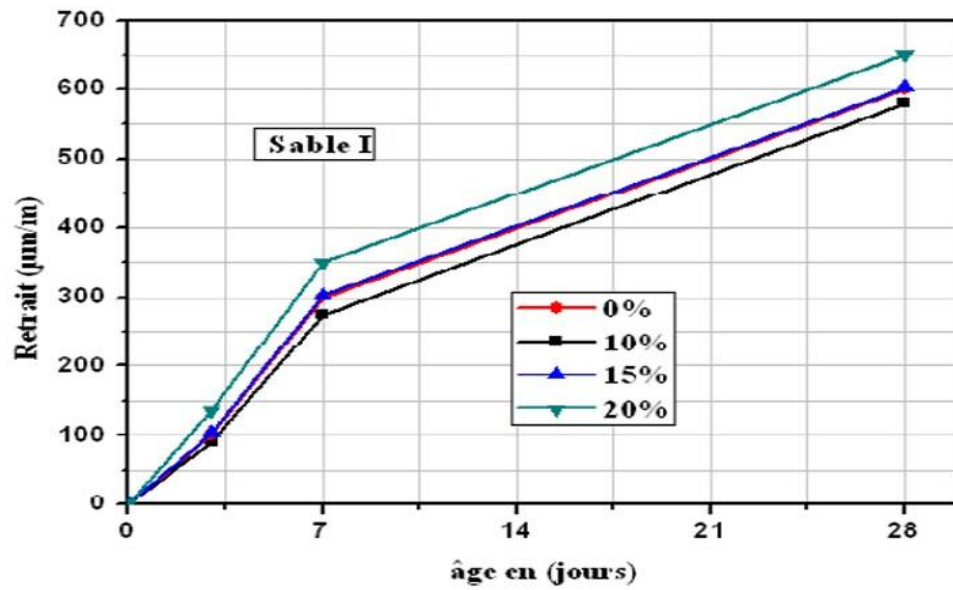


Figure 2-36 : Développement du retrait du béton à base de sable de concassage avec différents taux de fines. [49]

Selon Bonavetti et al.[30] plus la quantité des fines augmente plus la quantité d'eau augmente. Ceci peut être l'un des facteurs de retrait.

Ferkous et al. [52]. ont étudié le retrait des trois BAP en fonction de la teneur en fillers, ils constatent que le retrait augmente avec l'accroissement de dosage en fines qui peut atteindre des valeurs triples de celui d'un béton sans fines. Ce résultat est lié à la distribution et aux tailles des vides différentes entre les deux matériaux, aussi le retrait des bétons de granulométrie continue présente un retrait supérieur d'environ 35 % par rapport à celui des bétons de granulométrie discontinue (figure 2.37).

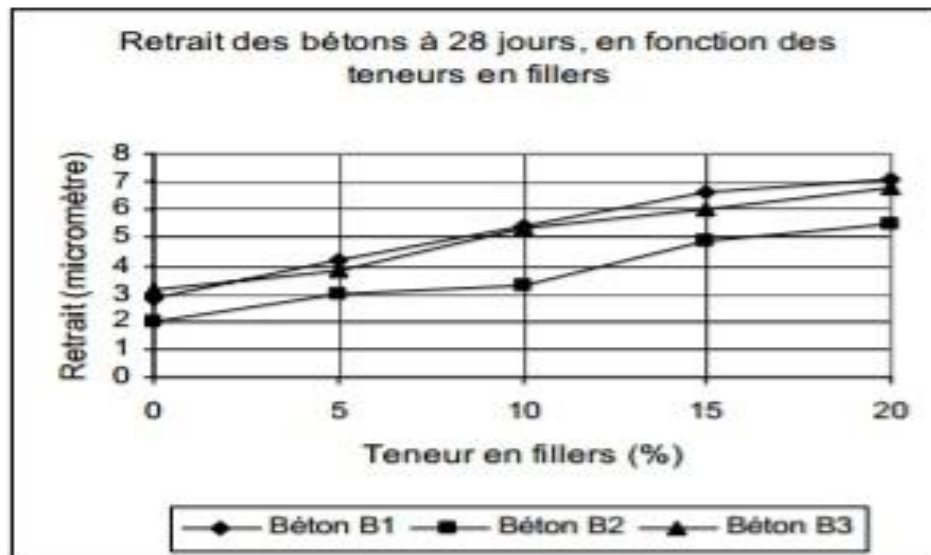


Figure 2-37 : Retrait des bétons à 28 jours, en fonction de la teneur en fillers. [52]

2.7.2 Mortier ou béton autoplaçant

2.7.2.1 Résistance à la compression

Benyamina [38] a étudié l'évolution de la résistance à la compression des mélanges de BAP avec et sans teneur en fines calcaires aux différents âges (figure 2.38) Il a obtenu que les mélanges avec fines calcaires présentent une résistance à la compression à 28 jours, inférieure à celle du béton témoin. En effet, il a observé une augmentation de la résistance à la compression pour les mélanges de BAP avec fines calcaires aux âges de 3 et 7 jours par rapport au béton témoin. Cette augmentation peut être due, d'une part, à l'augmentation de l'hydratation des grains de ciment due aux sites de nucléation créés par les fillers calcaires, et d'autre part, à l'effet de fillers.

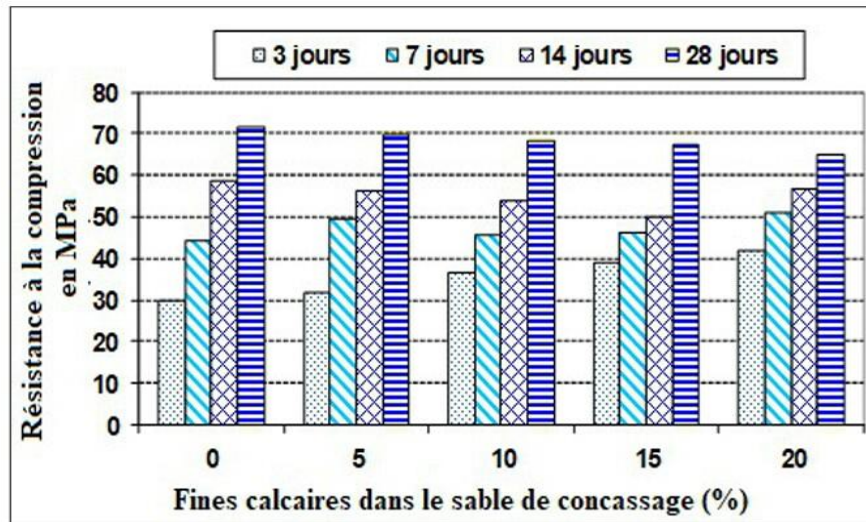


Figure 2-38 : Relation entre la résistance à la compression et la teneur en fine de calcaire.

[38]

Des recherches ont été menées par Gibbs et al.[53] sur l'effet des fines calcaires sur l'évolution de la résistance à la compression des BAP et des bétons ordinaires, les résultats trouvés montrent que l'évolution de la résistance mécanique est similaire à celles des bétons ordinaires comme illustre la figure 2.39.

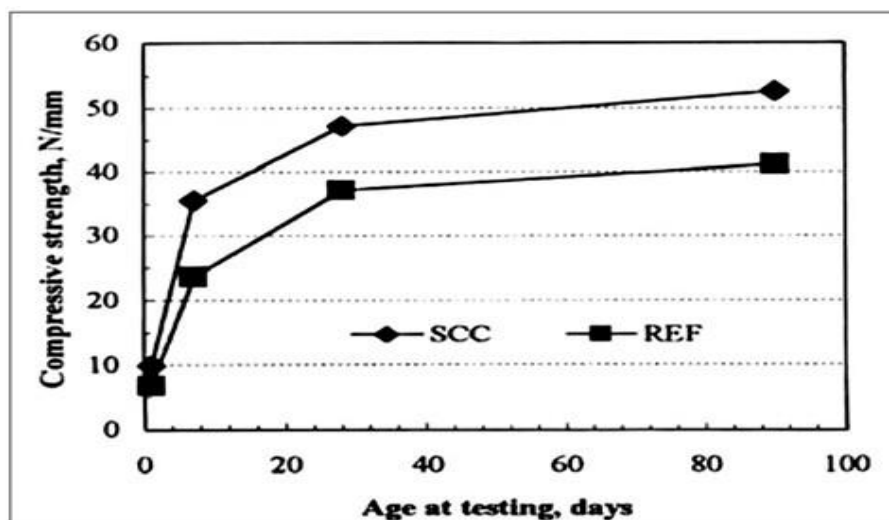


Figure 2-39 : Effet des fines sur l'évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un béton ordinaire. [53]

Felekoglu [54] n'illustre que l'incorporation de la poudre de calcaire avec une même quantité du ciment améliore la résistance à la compression des BAP.

Nibkin et al. [55] ont montré que la résistance à la compression du BAP augmente de 20 % et 38 % pour des rapports E/C de 0.6 et 0.47 respectivement à cause de l'accroissement de taux de fillers calcaires de l'ordre de 25 à 100 %.

R'mlli et al. [56] a fait une étude comparative entre les BAP et les BO à base de sable d'un concassage et autre de désert avec différents pourcentages, les résultats trouvés montrent que les résistances les plus élevées sont obtenus pour les BAP à fort dosage en SC. Et au-delà de 30 % de SD, ces résistances chutes remarquablement, et aussi dit que les résistances mécaniques des BAP sont les meilleures que celles des BO à base de 100 % de SC ou de 100 % de SD (figure 2.40).

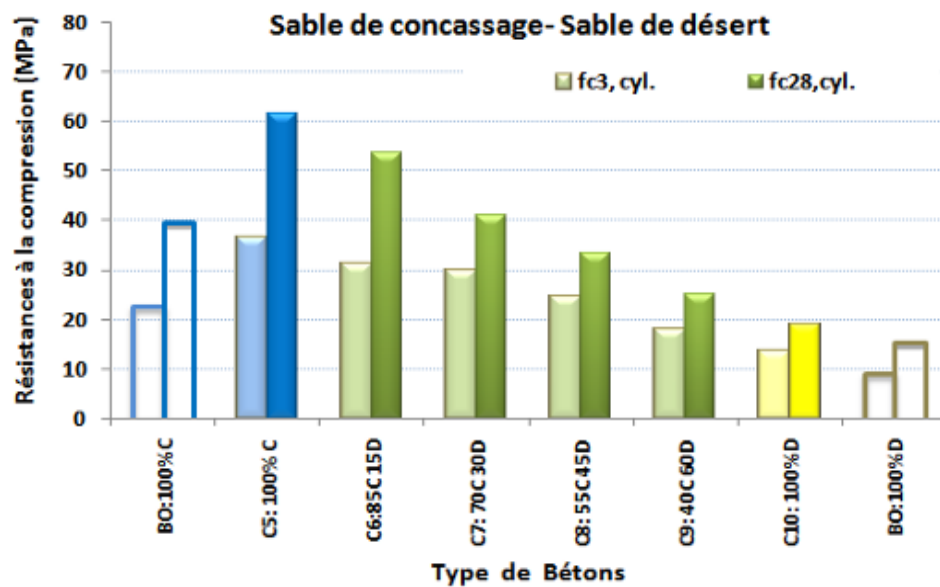


Figure 2-40 : Résistance à la compression des BAP et BO. [56]

Bellifa et al. [35] ont montré que quelque soit le pourcentage d'ajout, la résistance à la compression des BAP augmente au cours du temps (figure 2.41).

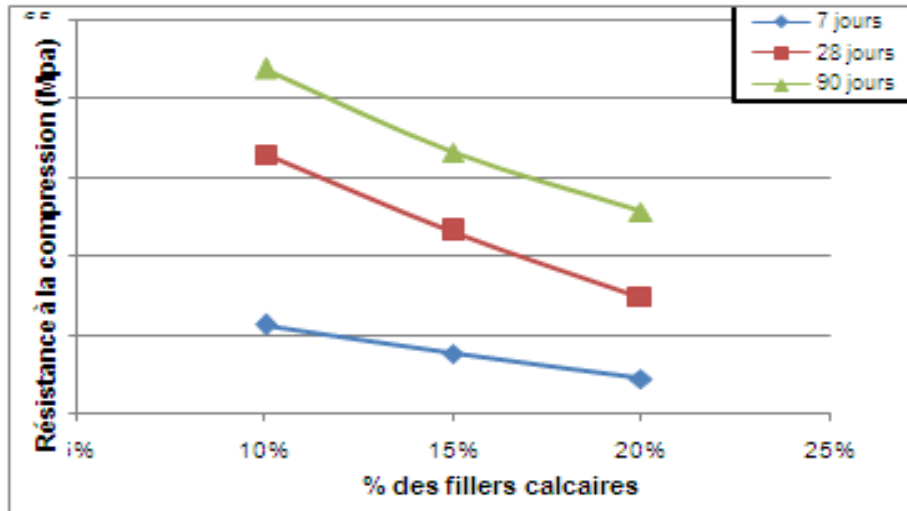


Figure 2-41 : Evolution de résistance à la compression des bétons autoplaçants. [35]

2.7.2.2 Résistance à la flexion

Benyamina [38] a examiné l'effet des fines calcaires sur la résistance à la flexion trois point aux âges de 3, 7, 14 et 28 jours pour les différents mélanges du BAP (figure 2.42), il montre que la résistance à la flexion de tous les mélanges du BAP est diminuée avec l'accroissement de taux de fine à l'âge de 28 jours et augmente au jeune âges.

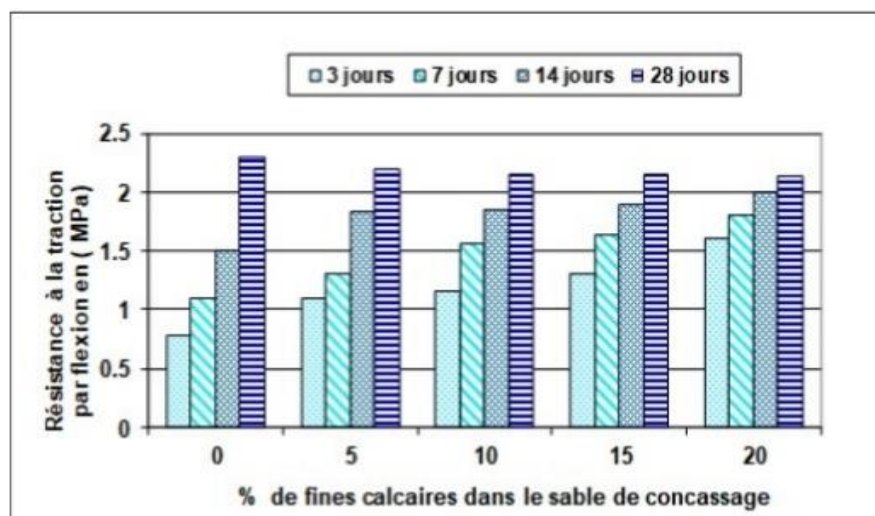


Figure 2-42 : Relation entre la résistance à la flexion et la teneur en FC. [38]

Des recherches [39] ont été mené sur l'évolution de la résistance à la flexion des trois types de mortier, les résultats trouvés montrent que les résistances à la flexion des mortiers autoplaçants diminue avec l'augmentation du dosage des fillers calcaires, cette diminution est due à la substitution d'une partie du liant par les fines calcaires comme illustre la figure 2.43.

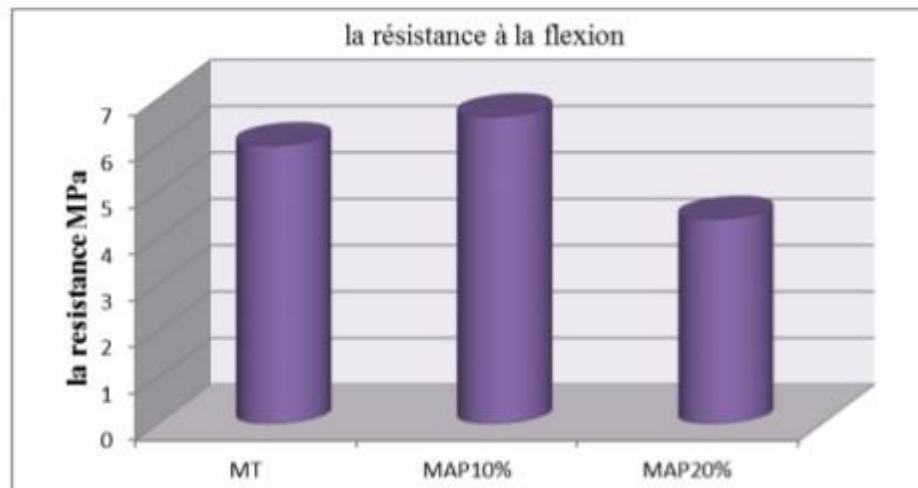


Figure 2-43 : Evolution de la résistance à la flexion à 28 jours des trois types de Mortiers.

[39]

D'autres travaux antérieurs [57] ont montré que la résistance à la traction par flexion augmente d'autant plus que la finesse du fillers calcaires est importante, les BAP formulés avec le fillers calcaire UF5 (le plus fin) présentes les meilleures résistances pour tous les âges. (Figure 2.44).

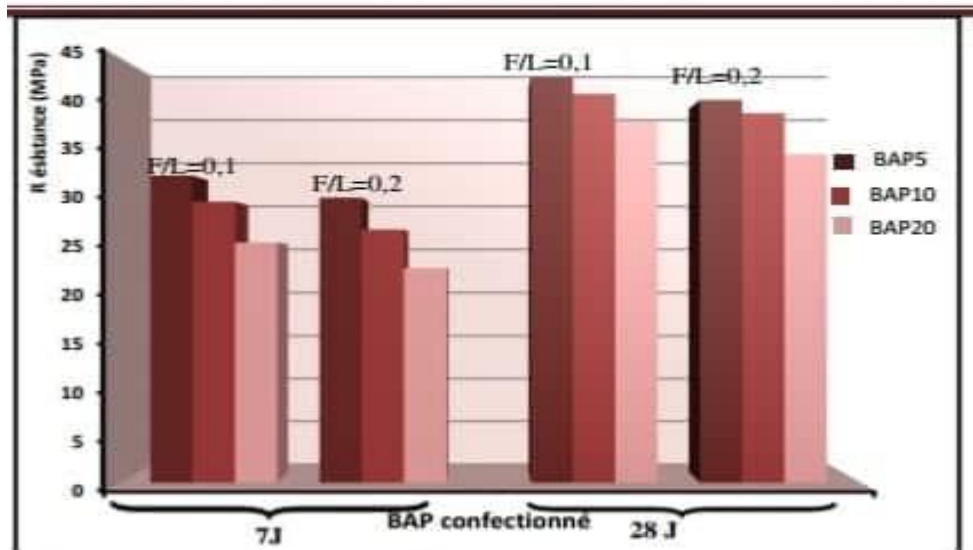


Figure 2-44 : Influence de la finesse du filler sur la résistance à la traction des Différents BAP confectionnés à 7 et 28 jours. [57]

2.7.2.3 Module d'élasticité

Des bétons autoplacants et autres vibrés ont été étudiées par des chercheurs [58] avec des résistances similaires et un rapport gravier sur sable G/S fixe, ils ont montré que le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des bétons ordinaires. En effet, un changement du rapport G/S provoque une réduction de module d'élasticité des BAP par rapport aux BO.

Ces résultats sont commentés par la quantité importante de la pâte dans les BAP, dont le module d'élasticité dépend immédiatement des proportions volumiques de ses constituants.

D'autres études [51] ont éprouvé que lorsque la résistance est constante, le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne distinct pas de ceux de béton ordinaire.

Des auteurs [59] ont examiné les bétons autoplacants et des bétons vibrés pour des résistances similaires et un rapport G/S fixé, les résultats trouvés montrent que le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des bétons ordinaires. Cependant, un changement de rapport G/S provoque une réduction du module d'élasticité des BAP par rapport au BO.

Parra et al. [60] ont étudié l'effet des fillers calcaires sur le module d'élasticité des BAP et des bétons vibrés, ils montrent que les modules d'élasticité des deux bétons sont pratiquement les mêmes aux jeunes âges, ce résultat est expliqué par l'effet des fines calcaires, qui accélèrent le processus d'hydratation du ciment au cours des premiers jours, cependant, entre les âges de 28 jours et 90 jours, le module d'élasticité est un peu plus faible d'environ 2% en moyenne. Ceci est expliqué par la forte teneur des BAP en pâte comparé au BV (figure 2.45).

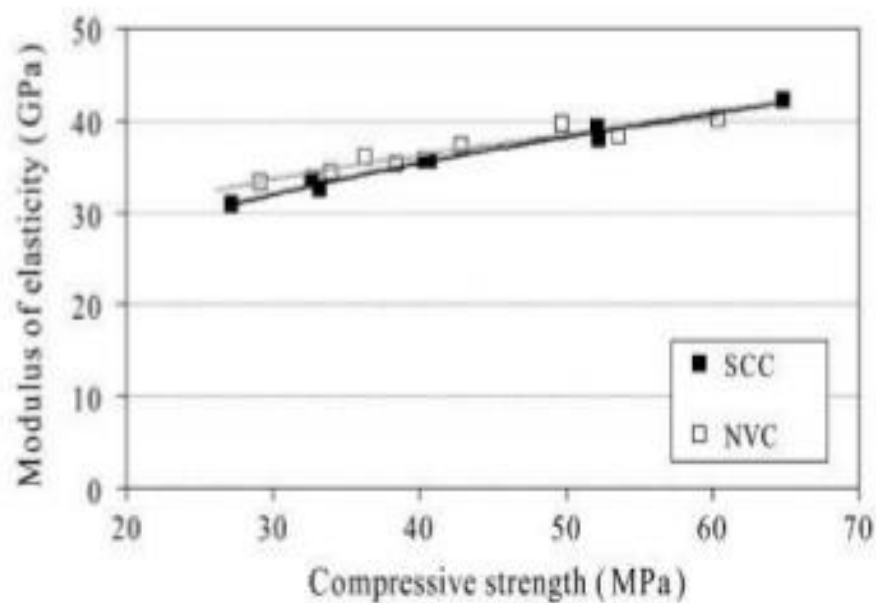


Figure 2-45 : Module d'élasticité à 28 jours et à 90 jours. [60]

2.7.2.4 Le retrait

- Retrait plastique

Gram H.E. and Piiparinen P. [61] ont étudié le retrait plastique des BAP et béton ordinaire. Ainsi que Assié.S [58] à trouver que le BAP et le béton ordinaire ont un retrait plastique équivalent pour une même classe de résistance. (Figure 2.46).

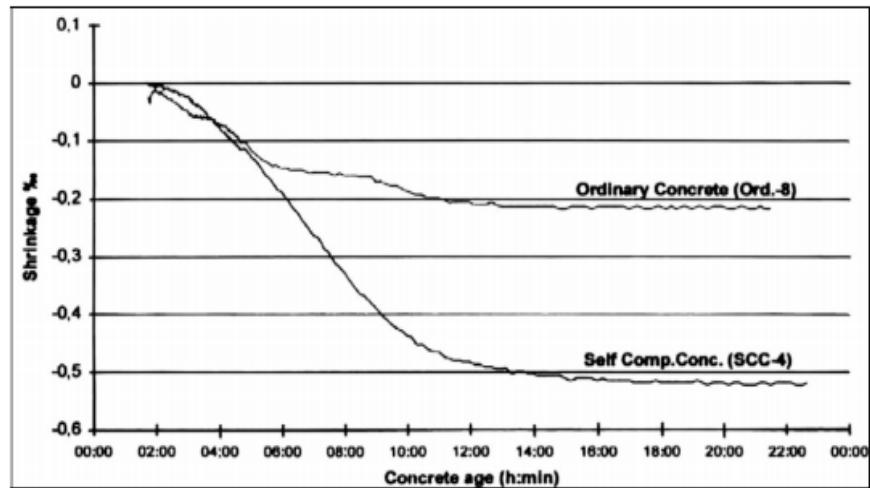


Figure 2-46 : Retrait plastique (comparaison entre BAP et BO) [58]

Turcry P [62] a trouvé que le retrait plastique des BAP est supérieure cinq fois que le béton ordinaire.

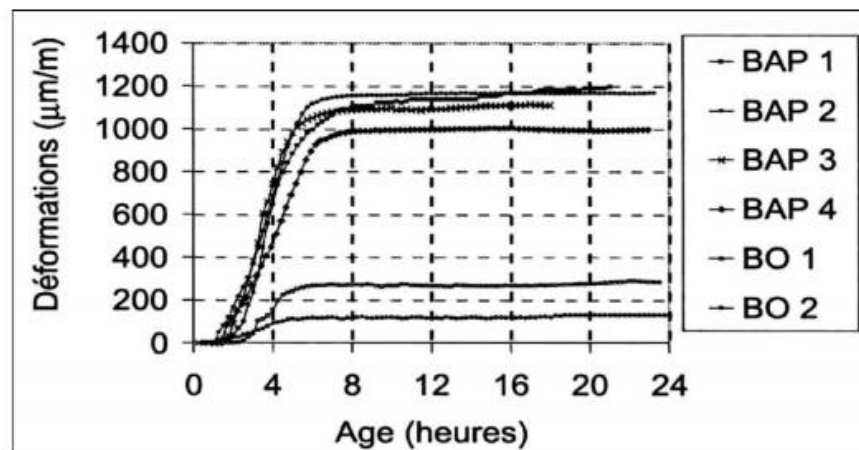


Figure 2-47 : Retrait plastique des BA et BV. [62]

- Retrait endogène

Assié S a montré que le retrait de BAP et de béton autoplaçant est équivalent à 28 jour, après 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 BA.

Une étude faite par Persson B.[63] montre que les BAP ont subi des déformations libres (retraits endogènes et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés. (Figure 2.48)

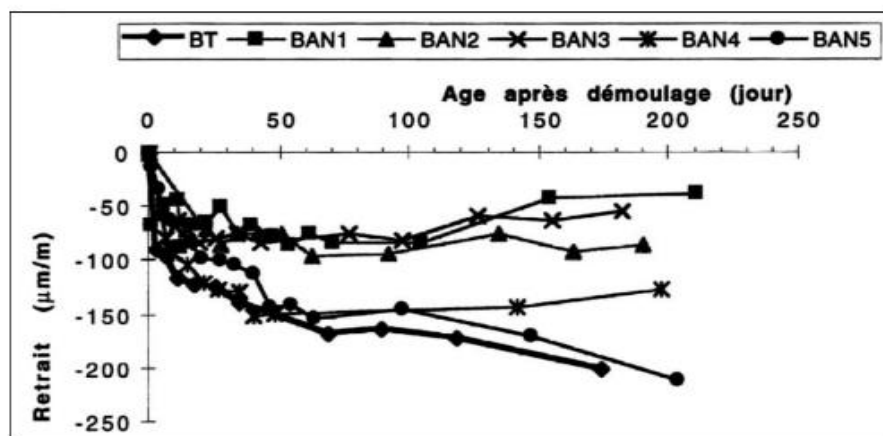


Figure 2-48 : Retrait endogène des BA et BV. [63]

Les déformations endogènes mesurées dès l'âge de 1 jour sont regroupées dans la figure

La cinétique des déformations des trois BAP est différente après les premiers jours de durcissement. En comparant le retrait endogène des bétons, nous remarquons l'influence de la présence des fines calcaires sur les déformations de retrait.

Le retrait endogène diminue quand le rapport F/C augmente. A` 28 jours, les déformations du BAP5 (F/C = 30 %) diminuent d'environ 42 mm/m par rapport au BAP4 (F/C = 20 %) et 16 mm/m par rapport au BAP2 (F/C = 25 %) correspondant respectivement a` des réductions de 32 % et 12 %. Quant a` l'échéance de 200 jours, les déformations ne sont réduites que de 14 % et 7 % respectivement.

Turcry [62], a aussi trouvé des résultats équivalant qui explique que le retrait endogène diminue quand le rapport F/C augmente, quel que soit le rapport E/F. La consommation de l'eau pour l'hydratation, principal facteur de retrait, dépend de la taille des pores et du degré d'interconnexion du réseau poreux. Ainsi nous pensons que dans les BAP contenant plus de fines calcaires (25 % à 30 %), les pores sont nombreux et leurs pâtes possèdent un volume solide plus important engendrant un contact entre les particules plus important induisant moins de retrait.(Figure 2.49).

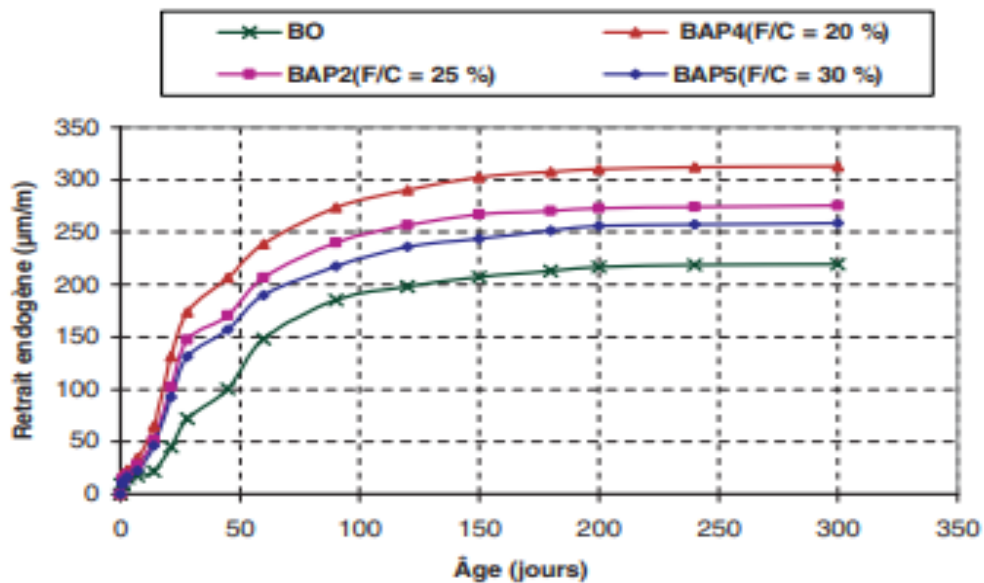


Figure 2-49 : Influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait endogène du béton autoplaçant (BAP). [62]

- Retrait de dessiccation

Sur la figure 2.50, représente l'influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait de dessiccation du béton autoplaçant ,il est remarqué que l'ors de l'hydratation le pores sont remplis par les hydrates , la quantités des hydrates diminue , avec l'ajout d'une quantité de fillers calcaire au ciment . et donc la taille des pores augmente avec la rapport F/C. [65]

Dans le cas des faibles rapports F/C , l'humidité relative des pores chute rapidement, parce que l'eau capillaire est vite consommée par les réactions d'hydratation [49]. Or la

diffusivité décroît avec la teneur en eau. Vis-à-vis de l'hydratation, la diffusivité doit donc diminuer avec le rapport F/C.

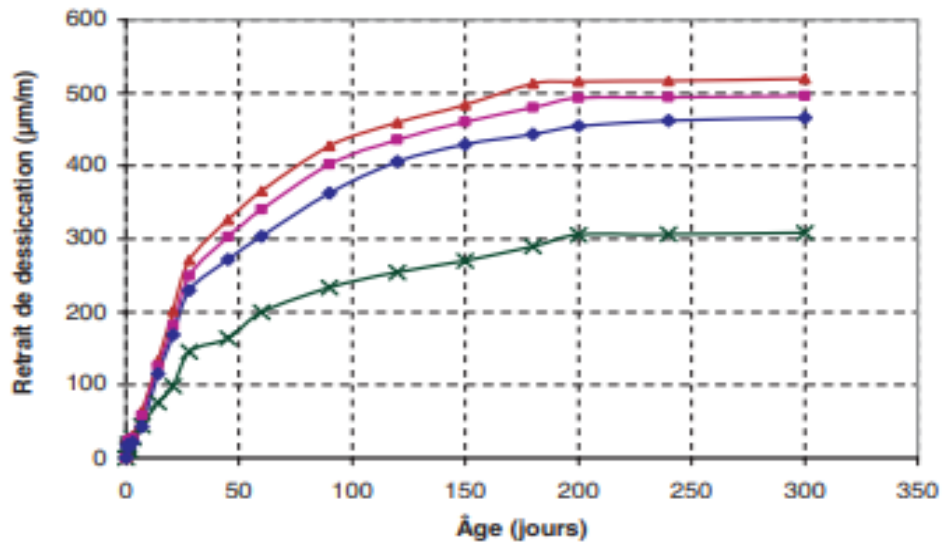


Figure 2-50 : Influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait de dessiccation du béton autoplaçant (BAP). [65]

- Retrait total

la figure 2.51, représente un graphe en fonction du $\log(t)$ le retrait total. Trois phases apparaissent. Pendant la première, le retrait augmente progressivement ; pendant la deuxième, il évolue linéairement avec le logarithme du temps ; au début de la troisième, la courbe du retrait s'infléchit vers une valeur stable. Il est déjà montré que le retrait de dessiccation n'est pas affecté par le rapport F/C. se qui déduit que c'est le retrait endogène qui contrôle l'amplitude du retrait total. Ce résultat ouvre des perspectives à l'optimisation des BAP. [64]

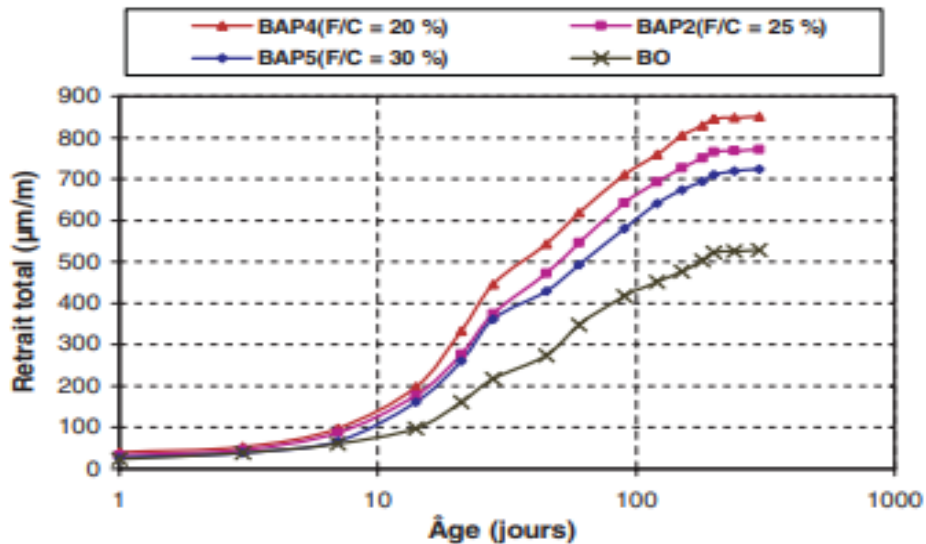


Figure 2-51 : Influence du rapport fines/ciment (F/C) sur le retrait total – échelle logarithmique [64]

2.8 Effets de sable de concassage sur les indicateurs de durabilité du béton et mortier ordinaire et/ ou autoplaçant

2.8.1 Béton et mortier ordinaire

2.8.1.1 Perméabilité à Léau

La plupart du temps, la perméabilité à l'eau est liée à la porosité du béton, plus les pores sont importants plus la perméabilité est élevée. Donc la pénétration des matières premières dans un mélange liée de sa perméabilité. ca est traduit par la loi de darcy [20].

Des essais ont été menés par Tsivillis et al. [38], ont montré que l'ajout de fine calcaire a

un effet positif sur la perméabilité du béton. la présence de près de 15 % de fine dans le sable de concassage peut améliorer la structure des pores dans la zone de transition et par conséquent réduire la perméabilité à l'eau. Menadi [43] constate que la profondeur de pénétration de l'eau est réduit comme l'illustre la figure 2.52.

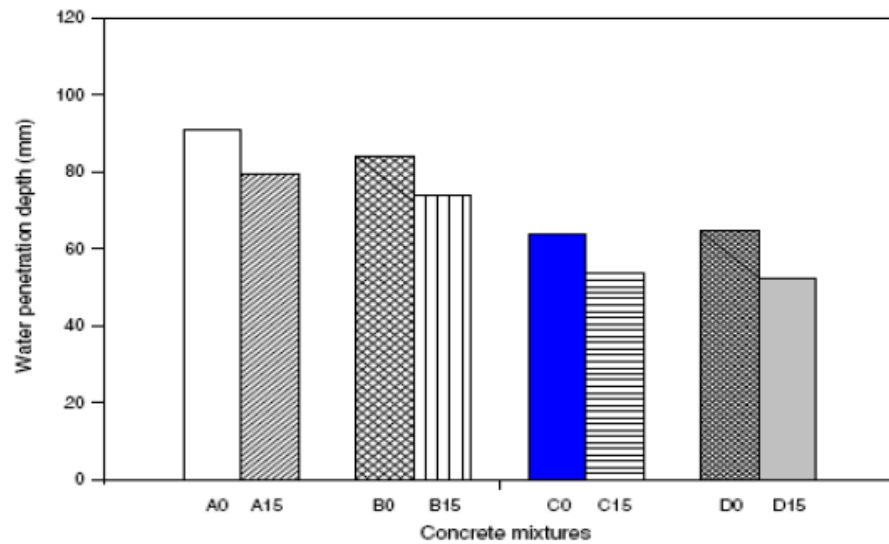


Figure 2-52 : Profondeur de pénétration à 90 jours en fonction des différents types de ciments (A, B, C, D). [43]

Des études faites par celik et al.[68] sur le coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différents pourcentage de poussière de concassage, ils ont montré que lorsque le taux de poussière augmente le coefficient de perméabilité diminue comme l'illustre la figure 2.53.

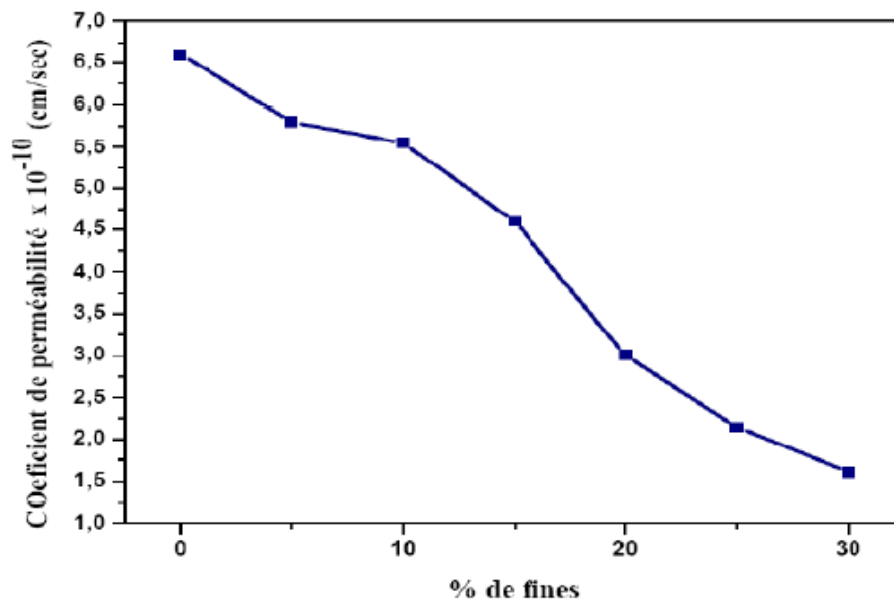


Figure 2-53 : Coefficient de perméabilité à l'eau du béton avec différents pourcentages de poussière de concassage à l'âge de 28 jours. [68]

Grace à L'incorporation des poussières de concassage dans le béton, la perméabilité à l'eau augmente. Cependant, cette augmentation est due à la diminution des pores dans la matrice cimentaire.

2.8.1.2 Absorption capillaire

Menadi et al. [69] montre que les mélanges du béton contenant des fines calcaires offrent une meilleure absorption par capillarité. Ce résultat causé par la faible porosité du béton.

Aussi, il a constaté que l'absorption d'eau augmente de 6 à 9 % pour les bétons de 15 et 25 % de fines en comparaison avec le béton sans fines calcaires. Habbouche [49] affirme que la présence de 10% de fines donne le coefficient de capillarité le plus faible. Des essais ont été menés par celik et al. [68] pour but d'étudier l'effet de poussière de concassage sur l'absorption de béton. Ils montrent que l'absorption du béton diminue avec l'accroissement de filler calcaire de 0 à 15%, et au-delà elle augmente comme l'illustre la figure (2.54.)

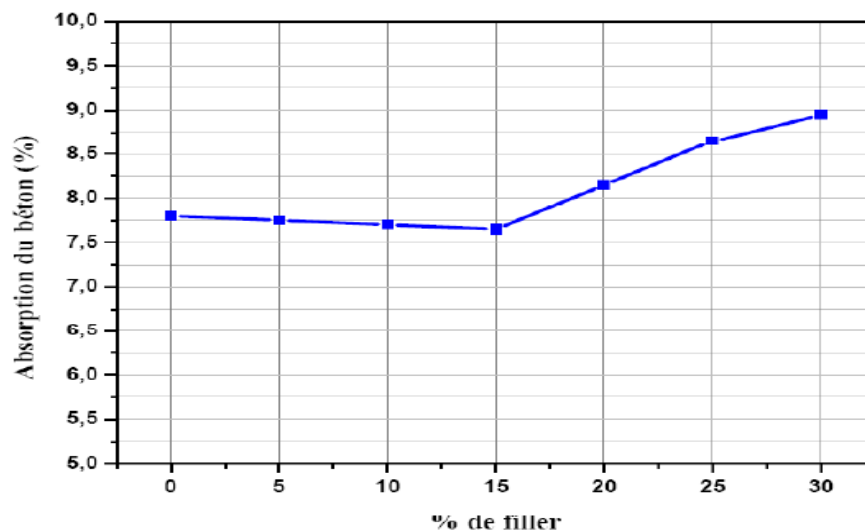


Figure 2-54 : Absorption du béton à 28 jours d'âge contenant différents pourcentage De poussières de concassage.[68]

Hadjoudja et al. [70] ont constaté que l'absorption d'eau par capillarité du béton contient des fines de brique, diminue à cause de l'augmentation du dosage de fillers. Cependant, cette augmentation est liée à la nature du filler de brique et littéralement à sa finesse

élevée, aussi à la granulométrie du sable utilisé. Le coefficient de capillarité diminue en fonction de l'augmentation du dosage en fillers comme l'illustre la figure 2.55. Cette diminution est due à la diminution de la porosité.

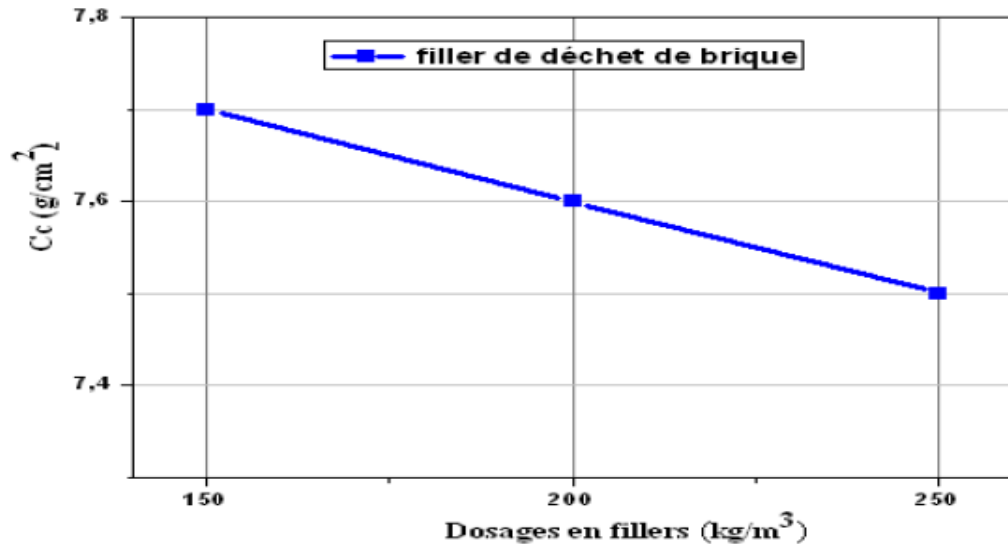


Figure 2-55 : Evolution du coefficient de capillarité en fonction du pourcentage des fillers dans le béton. [70]

Les chercheurs [71] ont montré que les fillers calcaires a un effet avantageux sur l'absorption capillaire, par contre l'absorption par immersion affecté négativement.

2.8.1.3 Perméabilité é au gaz

Kenai et al.[60] ont montré que le coefficient de la perméabilité au gaz du béton augmente à cause de l'influence de fillers calcaires dans le sable de concassage. Cette augmentation de la perméabilité au gaz mesurée est de 5, 10,16 et 30% respectivement pour 5, 10,15 et 20% de fines calcaires. Ces résultats sont confirmés par les résultats de travaux de Menadi et al. [69] comme l'illustre la figure 2.56.

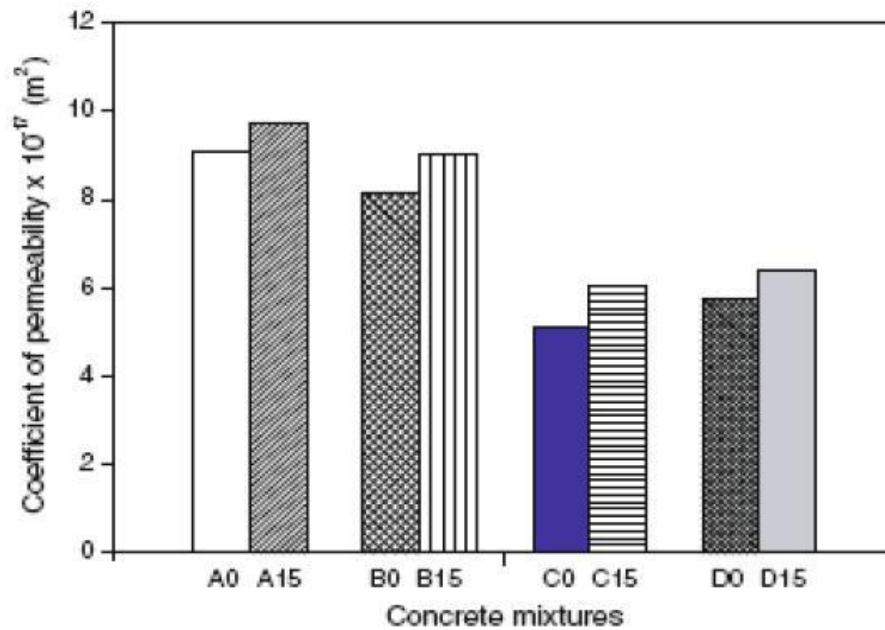


Figure 2-56 : Valeurs du coefficient de la perméabilité au gaz des bétons avec et sans fines Pour différents types de ciments. [69]

2.8.1.4 Perméabilité aux Ions chlorure

Bonavetti et al. [30] ont étudié la relation entre la pénétration des ions de chlorure des bétons et la cure humide et à l'air. Cette étude montre que dans le cas d'une cure humide la diffusion des ions chlorure augmente avec l'augmentation de pourcentage des filles de calcaire. Néanmoins, pour les bétons sans cure, la profondeur de pénétration des ions de chlorure est supérieure de 7 à 30 mm par rapport au béton avec cure, et aussi, pour les bétons sans ajout, la profondeur de pénétration est de 10 à 15 mm pour 10% de fines et de 17 à 20 mm pour 20% de fines comme illustre la figure 2.57.

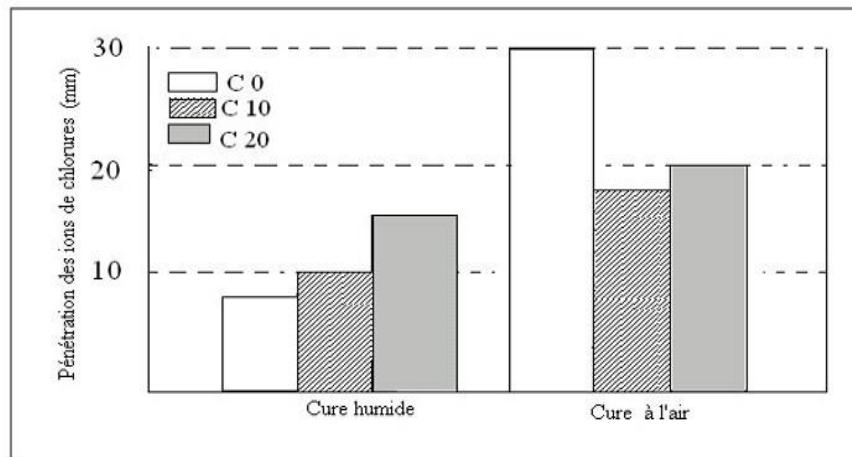


Figure 2-57 : Pénétration des ions de chlorure des bétons avec cure humide et à l'air. [30]

Beixing et al.[7] a étudié l'influence de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlorure du béton de sable de concassage de faible et de haute résistance. Il a été trouvé que la perméabilité aux ions chlorure augmente avec l'augmentation du pourcentage de fines dans le sable de concassage pour les bétons de faible résistance par contre les fines de calcaire qui se trouve dans le sable de concassage influent légèrement sur la résistance à la pénétration des ions chlorure. Le béton de haute résistance a un dosage en ciment très fort et un rapport E/C plus faible. (Figure 2.58).

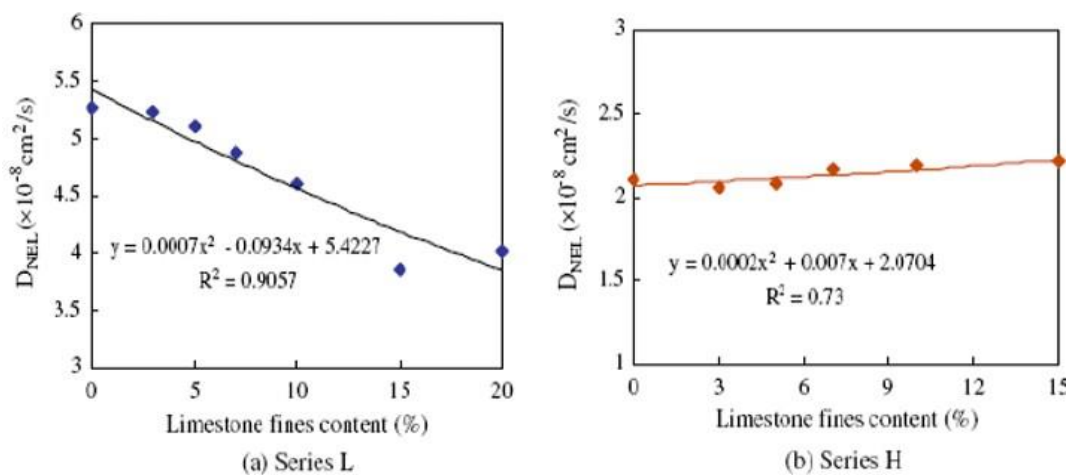


Figure 2-58 : Influence de fines calcaires sur la perméabilité aux ions chlorure du béton de sable de concassage de faible (a) et de haute (b) résistance à 28 jours. [7]

2.8.1.5 Résistance aux sulfates

Les ions de sulfate se trouvent dans certains sols et eaux souterraines. Deux types d'attaque sont distingués, l'attaque sulfatique interne 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.

Hadj sadouk [48] trouvé une perte de résistance à la compression pour les éprouvettes des mortiers avec 0, 15 et 20% d'ajout calcaire immergées dans la solution de sulfate de sodium (5% de Na_2SO_4) dans tous les âges (fig 2.59,2.60) . Néanmoins, il a constaté que pour les ciments de 5 et 10% d'ajout calcaire, la résistance à la compression est augmenté légèrement jusqu'à deux mois de conservation et au-delà elle diminue .toutefois, les mortiers avec 5 et 10% d'ajout calcaire présentent une perte de résistance de 11 et 4% après 180 jours. Cette diminution est moins importante que celle enregistrée pour les mortiers avec 0,15 et 20%d'ajout calcaire, qui est de 29,20 et 22%, respectivement. Cependant, les éprouvettes conservées dans la solution de sulfate de magnisieum, tous les mortiers inespérés une perte de résistance à la compression.il a montré que la perte de résistance à la compression des éprouvettes conservées dans 5% de MgSO_4 est plus essentielle que celle des éprouvettes immergées dans la solution de 5% de NaSO_4 .

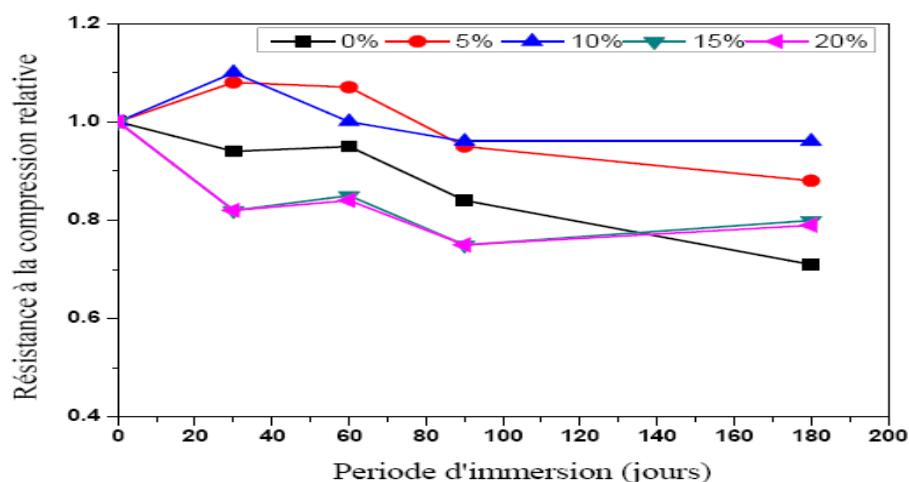


Figure 2-59 : Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de soudium (5% NA_2SO_4). [48]

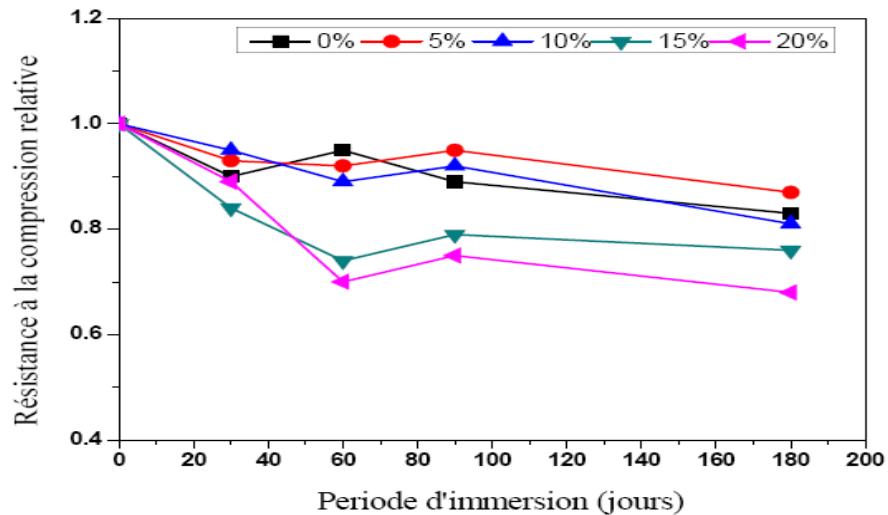


Figure 2-60 : Résistance à la compression relative des mortiers au calcaire immergée dans les sulfates de magnésium (5% MgSO₄). [48]

2.8.2 Béton et mortier autoplaçant

2.8.2.1 Perméabilité à Léau

La figure 2.61 montre l'effet des fines calcaires sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression pour des mélanges de BAP à 180 jours. Les résultats trouvés montrent une relation inversement proportionnelle entre la profondeur de pénétration d'eau et le pourcentage de fine dans les différents mélanges jusqu'à 15 % [72]. Pour les échantillons avec un taux supérieure à 15 %, la pénétration de l'eau devient plus profonde.

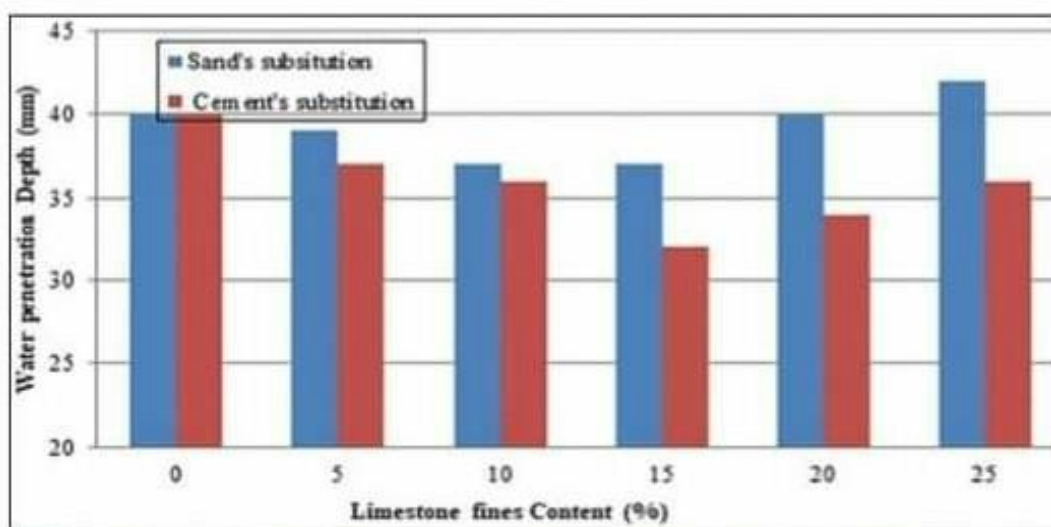


Figure 2-61 : Effet des fines calcaires sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression pour des mélanges des BAP à 180 jours. [72]

2.8.2.2 Absorption capillaire

Boel [73], démontré que l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons ordinaires, ainsi, les deux paramètres cités précédemment augmentent avec l'augmentation du rapport E/C et la porosité du BAP. L'utilisation des fines calcaires dans la confection des BAP a un effet positif et négatif pour l'absorption par capillarité et par immersion respectivement.

Benyamina [38] constate que l'augmentation de la teneur en fillers calcaires dans le sable de concassage diminue l'absorption par capillarité dans les différents mélanges de béton autoplacants (figure 2.62). L'augmentation de la teneur en filles calcaires 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. Cette diminution à cause de remplissage des pores par des fines calcaires entrainant une diminution de la porosité de la pâte des mélanges, et par conséquent, une diminution de l'absorption capillaire.

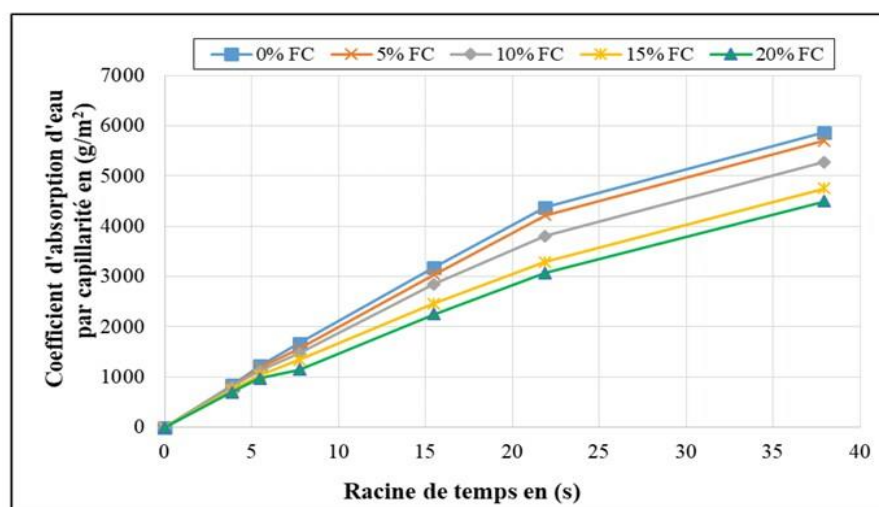


Figure 2-62 : Absorption d'eau par capillarité des différents mélanges de BAP. [38]

L'effet des fines calcaires sur l'absorption d'eau pour des mélanges de BAP avec un remplacement du sable et du ciment par les fines calcaires ont été étudié [72] les résultats trouvés montrent que l'absorption d'eau augmentent légèrement avec l'augmentation du

taux de fines, aussi, ces résultats montrent que l'ajout des fillers calcaires jusqu'à 15 % comme remplacement de sable au de ciment n'a aucun effet sur l'absorption d'eau du différents mélanges du BAP comme illustre la figure 2.63.

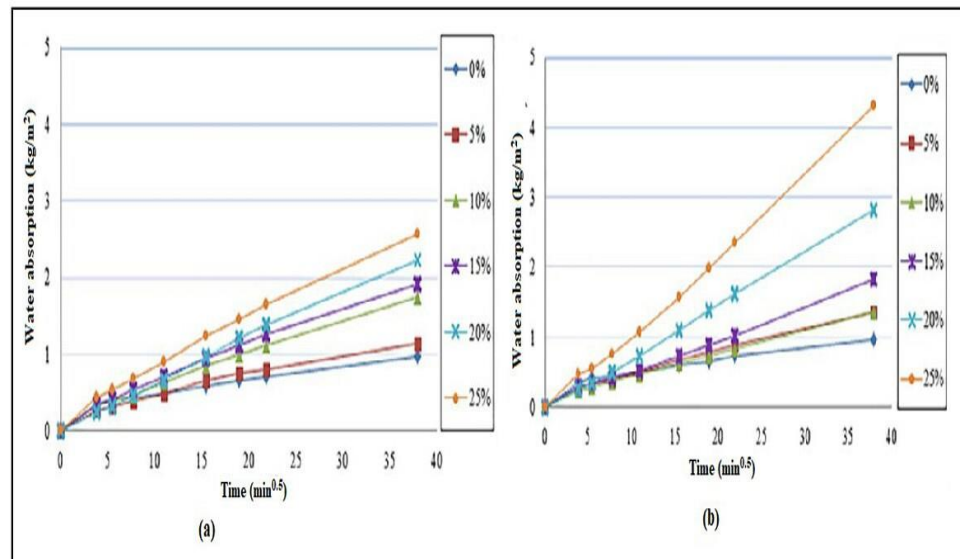


Figure 2-63 : Effet de la teneur des fines sur l'absorption d'eau pour les mélanges de BAP : a) remplacement du SC par LF, b) remplacement du ciment par LF. [72]

Zhu et al. [74] ont constaté que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fines calcaires.

Des chercheurs [56] ont constaté que les coefficients d'absorption par capillarité et par immersion des BAP et des BO augmentent avec l'accroissement de la teneur en SD comme illustre les figures 2.64 ; 2.65.

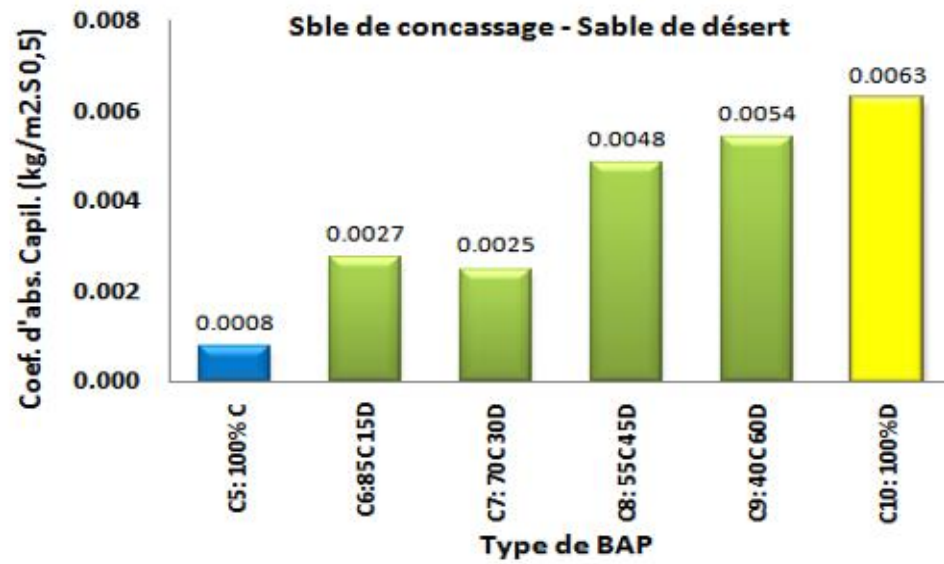


Figure 2-64 : Coefficients d'absorption d'eau par capillarité des BAP. [56]

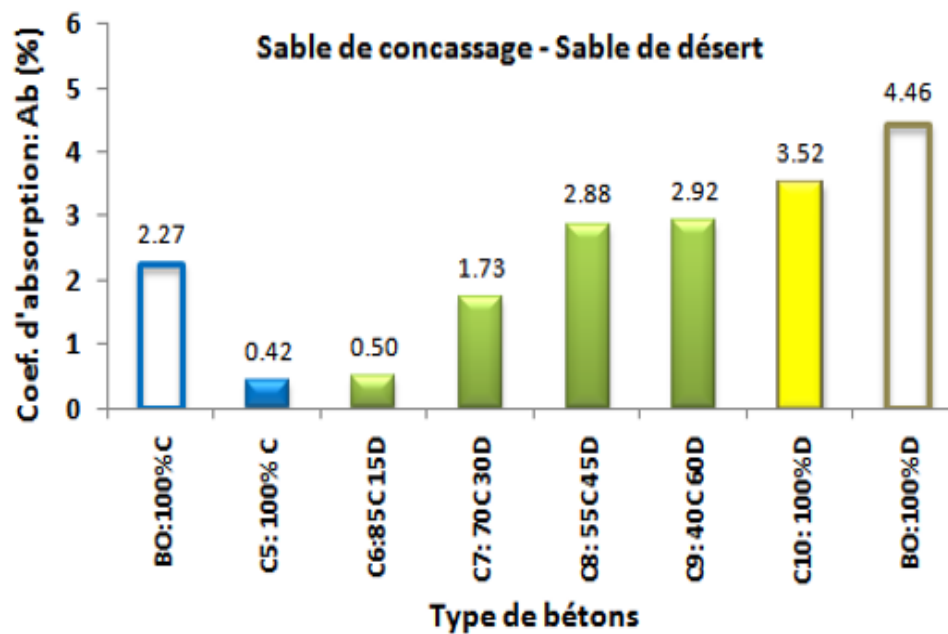


Figure 2-65 : Coefficient d'absorption d'eau par immersion des BAP et BO. [56]

2.8.2.3 Perméabilité au gaz

Des recherches [75] ont constaté que les fillers calcaires offrent au BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés avec des rapports E/C équivalent. Aussi, la porosité de ces BAP est plus faible que celle des bétons vibrés. Les mélanges de BAP sont plus résistants à la pénétration d'un gaz tel que l'oxygène que les mélanges de béton vibré. Par conséquent, la perméabilité au gaz pour un BAP60 est plus délicate que celle d'un béton vibré BV60. Assie [58] (figure 2.66).

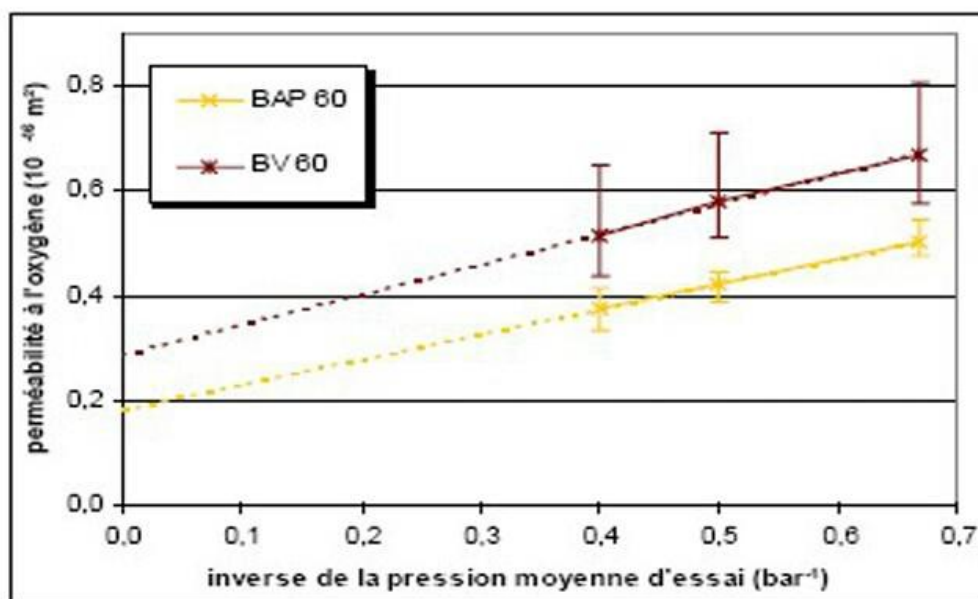


Figure 2-66 : Comparaison de la perméabilité au gaz entre un BAP et BV. [58]

Des chercheurs [74] ont montré que la perméabilité de BAP au gaz est faible par rapport aux bétons vibrés comme illustre la figure 2.67, et aussi montre que la diminution de la perméabilité est due à l'emploi d'addition minérales dans le BAP.

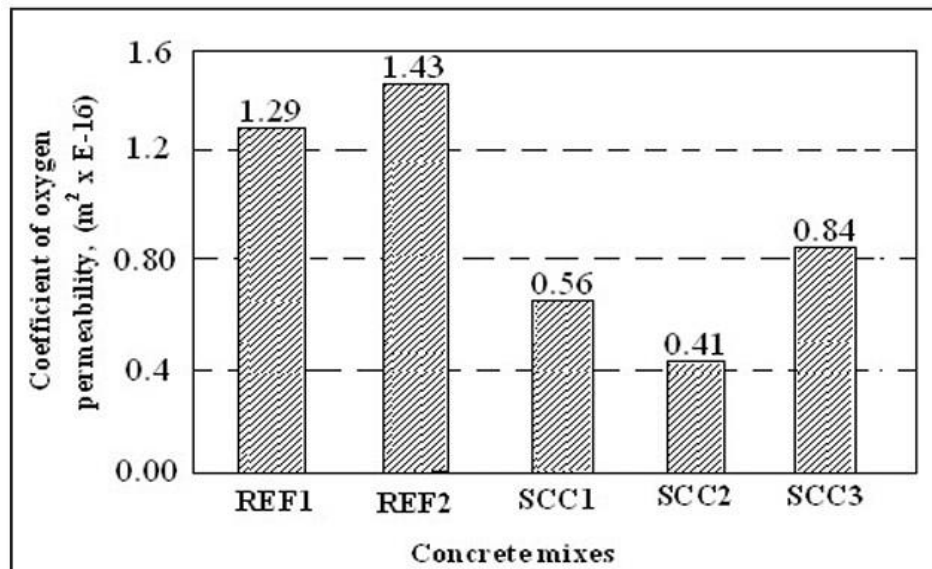


Figure 2-67 : Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants. [74]

R'mili et al. [56] constatent que le coefficient de perméabilité au gaz des BAP diminue avec l'ajout de SD ou SC (figure 2.68).

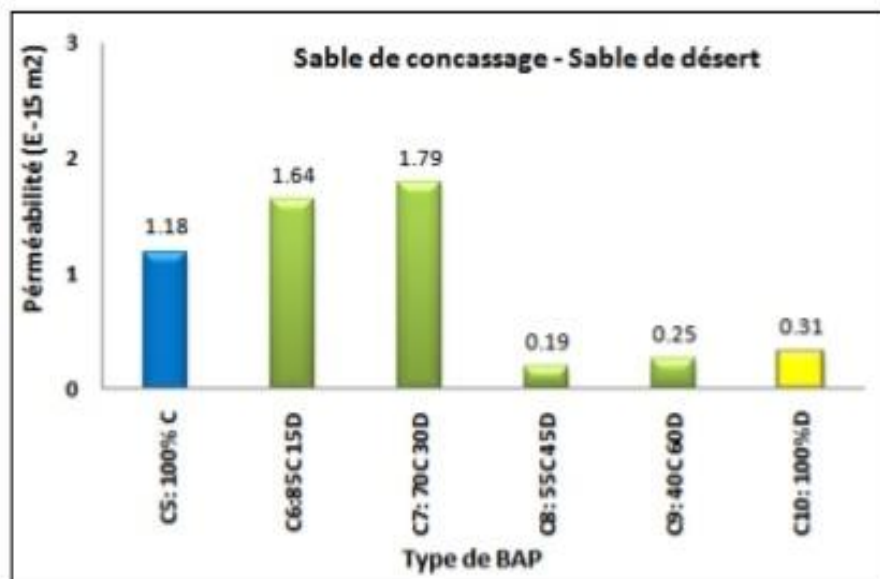


Figure 2-68 : Coefficient de perméabilité des BAP. [56]

2.8.2.4 Perméabilité aux Ions chlorure

Benyamin et al. [76] ont examiné l'effet des fillers calcaires sur le coefficient de diffusion des ions chlorures des BAP (figure 2.69), les résultats trouvés montrent que le coefficient de migration des ions de chlorures diminue avec l'accroissement de pourcentage des fines tel que avec 0 % de fines le coefficient de diffusion obtenu est égal à 6.26×10^{-12} m²/s alors qu'il est égal à 3.16×10^{-12} m²/s pour les BAP de 20 % de fines.

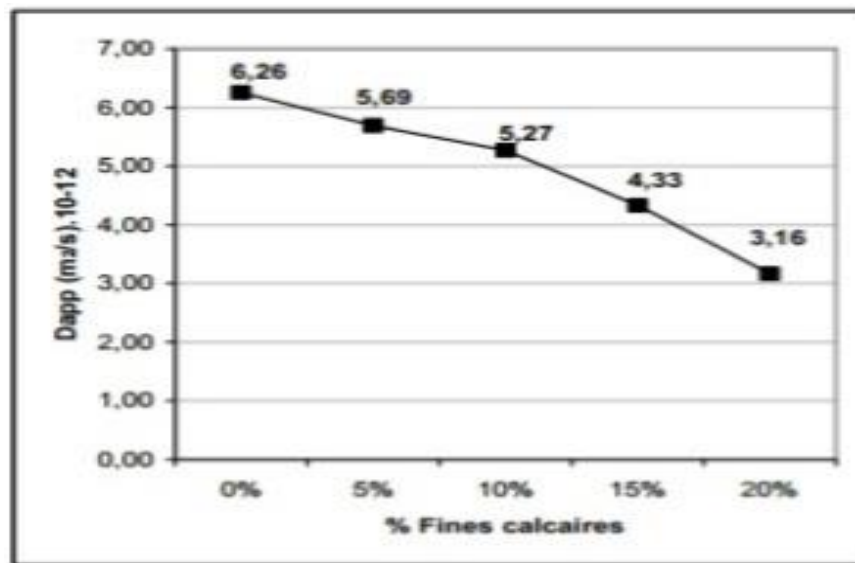


Figure 2-69 :Essai de migration des ions de chlorures. [76]

Siad et al. [77] ont examiné la variation des coefficients de diffusion des ions chlorures des trois BAP avec ajouts minéraux différents et autre ordinaire vibré (figures 2.70, 2.71, 2.72), les résultats trouvés montrent que les BAP PZ et les BAP CV présentent des coefficients inférieure à ceux des BAP FC et des BOV et la différence devient plus important avec la classe de résistance 30 MPA. Ces résultats sont en accords avec ceux d'audenaert et al. qui ont conclu que la diminution de ce coefficient est liée à la distribution des pores et à leurs tailles plus petites dans les BAP PZ et les BAP CV.

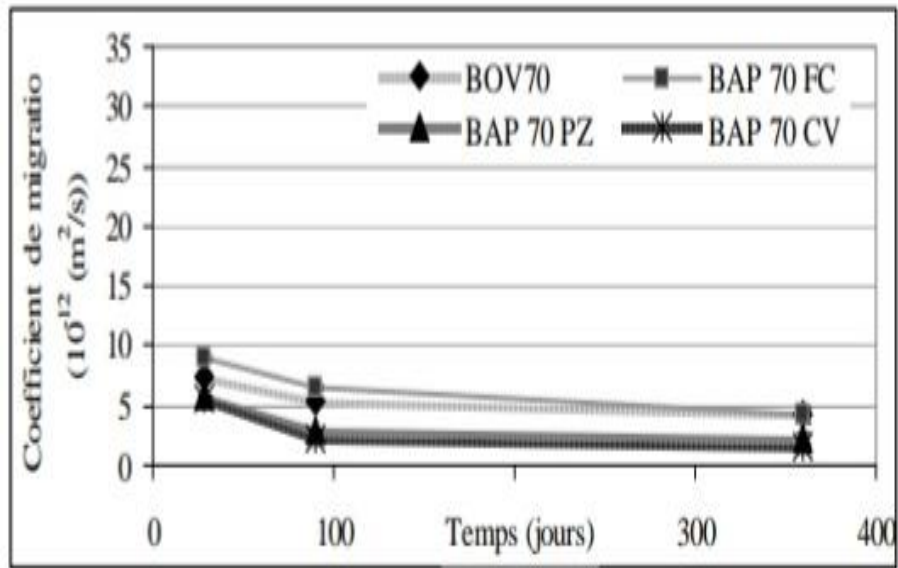


Figure 2-70 : Coefficient de diffusion apparent des bétons étudiés, après 28 jours de cure.

[77]

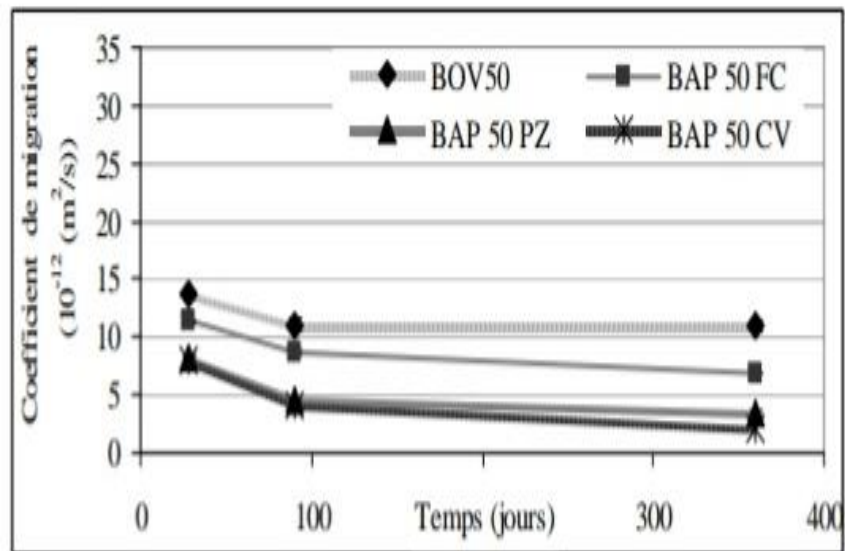


Figure 2-71 : Coefficient de diffusion apparent des bétons étudiés, après 90 jours de cure.

[77]

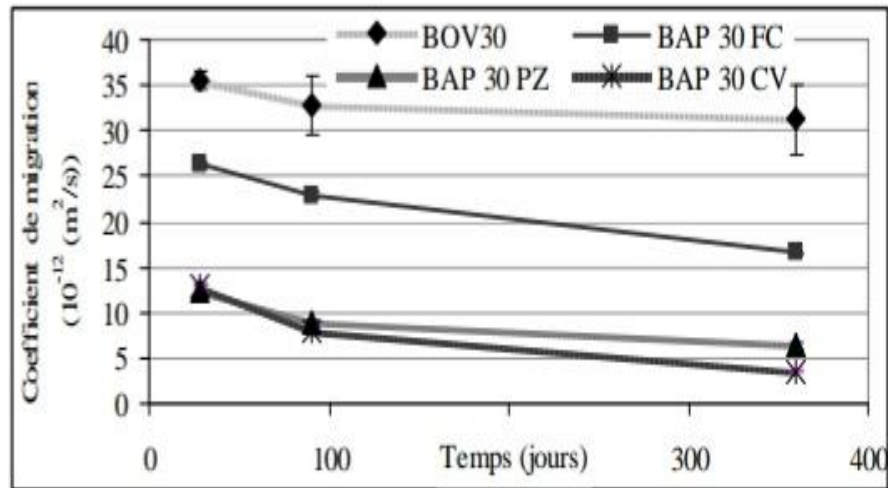


Figure 2-72 : Coefficient de diffusion apparent des bétons étudiés, après 360 jours de cure.

[77]

Des auteurs [78] ont étudiés l'effet des trois types d'additions minérales sur la diffusion des ions chlorure, ils constatent que le coefficient de migration dépend de la nature de l'addition ; cependant le BAP avec filler calcaire est le seul béton qui présentent un coefficient de diffusion important par rapport aux autres additions (figure 2.73).

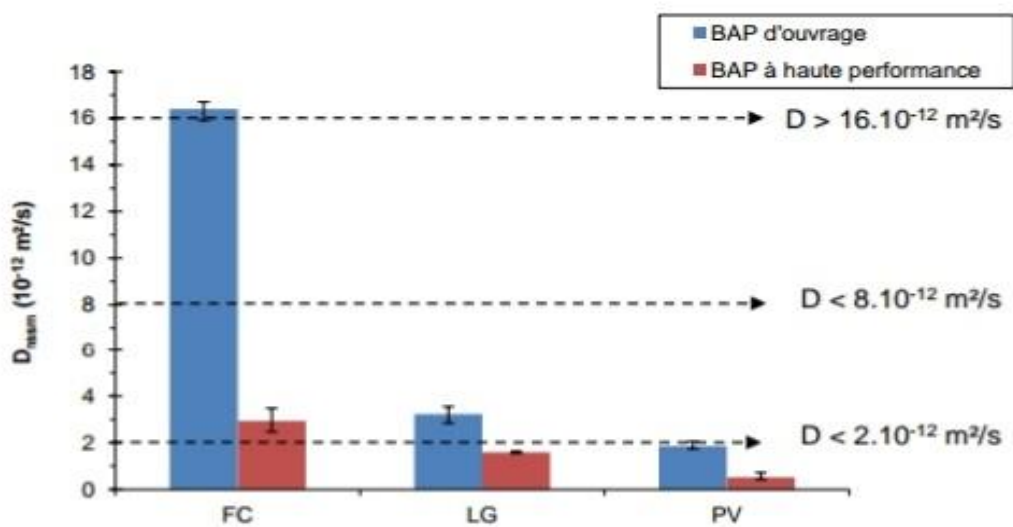


Figure 2-73 : Coefficient de migration des BAP d'ouvrage et des BAP à haute performance. [78]

2.8.2.5 Résistance au sulfate

Des chercheurs [79] ont comparé des BAP à base de différents pourcentages de filler calcaire et des BOV. ils ont 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 ne dépend pas de la quantité de filler calcaire présente dans le BAP. (Figure 2.74)

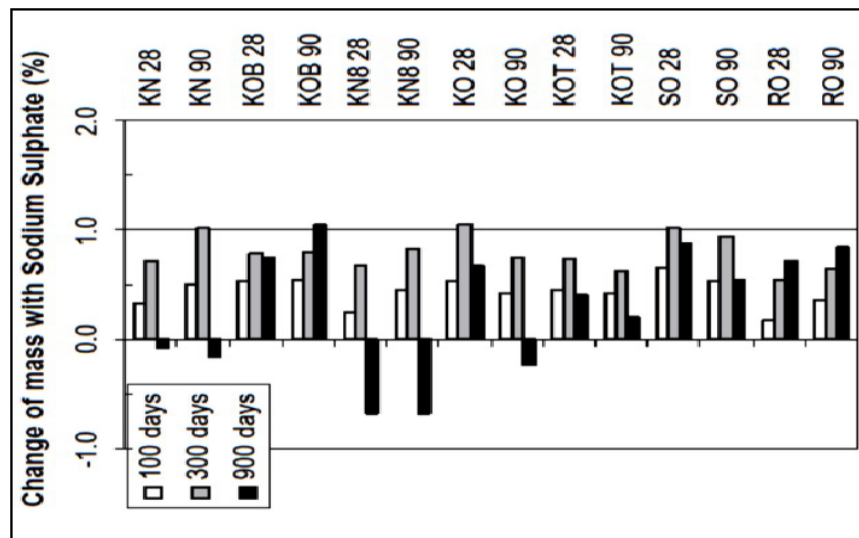


Figure 2-74 : Variation de la masse après immersion dans la solution de 18 g/l de sulfate de sodium (Na_2SO_4). [79]

Khelifa [80] a remarqué que les bétons les plus poreux sont moins résistants ce qui est représenté par la figure suivante. Alors que les deux ciments utilisés sont de la même classe (42.5), la résistance des bétons issus de ces deux ciments différents pour un même rapport E/C. la différence de porosité permet d'expliquer en partie cette différence de résistance. (Figures 2.75).

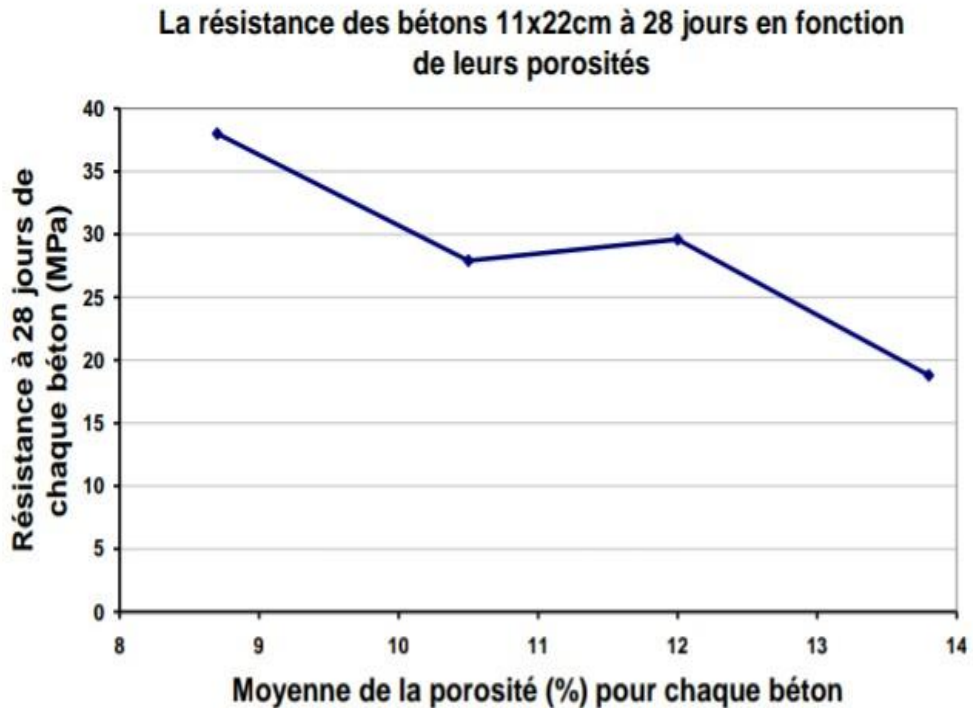


Figure 2-75 : La résistance des betons à 28 jours en fonction de leurs porosites. [80]

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu l'influence du sable de concassage sur les propriétés des mortiers et bétons autoplaçants à l'état frais et durci, plusieurs recherche ont été faite, les résultats trouvés montrent qu'on peut remplacer le sable naturel avec un pourcentage de fines de 15 à 18% pour la fabrication d'un béton car ils ont presque les même propriétés ce qui conduit a trouvé des solutions idéale au problème d'approvisionnement et d'environnement.

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents matériaux principaux utilisés dans la formulation du béton et leurs caractéristiques principales, ensuite on décrit la méthode de formulation adoptée pour le protocole des essais effectués.

3.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

3.2.1 Ciment

Le type de ciment utilisé dans cette étude est un ciment du type CEM II 42.5, conforme à la norme NF P 15-471 [81]. 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 [38]

| Compositions chimiques (%) | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|------|-----|
| CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | Na ₂ O ₃ | K ₂ O | PAF | RI |
| 64 | 22 | 4,6 | 4,9 | 0,8 | 1,1 | 0,12 | 0,4 | 1,14 | 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 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).

Le module de finesse et l'équivalent de sable pour le sable (SC) est de 3.15 (70%).

Le sable de concassage a été tamisé afin d'enlever les fines inférieures à 80 μ m. 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 du sable de concassage. [38]

La densité apparente du sable SC est de 2,54 et son absorption est de 0,02.

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 [38]

| 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 |

3.2.3 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 (3.3).

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 résidu |
|---------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|-------------------|------------------|--------------|------------------|
| Sable de concassage | 54.3 | 1.78 | 0.79 | 0.34 | 0.20 | - | - | | 42.5 | - |

La courbe granulo-laser des fines calcaires est présentée sur la figure 3.2

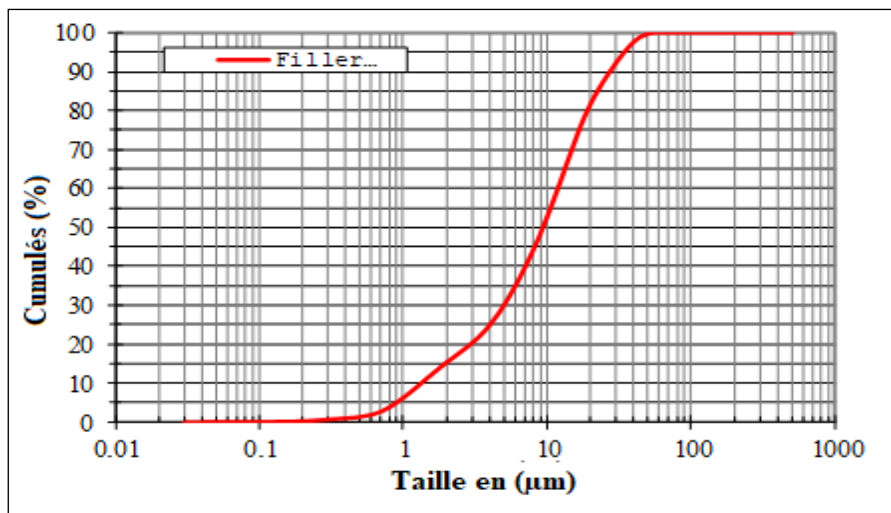


Figure 3-2 : courbe granulo-lazer des fines calcaires. [38]

3.2.4 Superplastifiant

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaire à l'obtention d'un BAP. Le superplastifiant utilisé pour les mélanges de béton est un superplastifiant et haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates. Le superplastifiant choisi, de dénomination commerciale MEDAFLOW 30 de la société Granitex, est un produit adapté pour les applications des BAP. Il se présente sous forme d'un liquide avec une plage de dosage comprise entre 0,5% à 2% en masse de poudre. Sa densité est de 1,06, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 0,1% et il possède entre 28,0 et 31,0 % d'extraits secs.

3.2.5 L'eau de gâchage

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 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.

D'après les recommandations de Domone et al. [82], 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 $2 \text{ sec} \leq t \leq 10 \text{ sec}$ [82].

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

Le rapport (E/L) est un paramètre très important dans la formulation d'un mortier autoplaçant, 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. [83] 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 autoplaçant qui répond aux critères cités précédemment. Les résultats trouvés ont permis d'adopter un rapport E/L de 0,40.

3.3.2 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 pour rapport (S/M) égal à 0.5 pour tous les essais programmés.

3.3.3 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.

3.4 Essais sur le béton autoplaçant à l'état frais

3.4.1 Essais d'ouvrabilité

3.4.1.1 Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement il s'agit de remplir un cône (cône d'abrams) (figure 3.3) qui est déposer sur une plaque horizontal humidifier par le béton jusqu'à la face supérieur du cône .Ensuite soulever le cône verticalement et laisser le béton s'écouler, une fois le béton s'est étaler mesurer le diamètre final sur deux cotés perpendiculaire. [84]

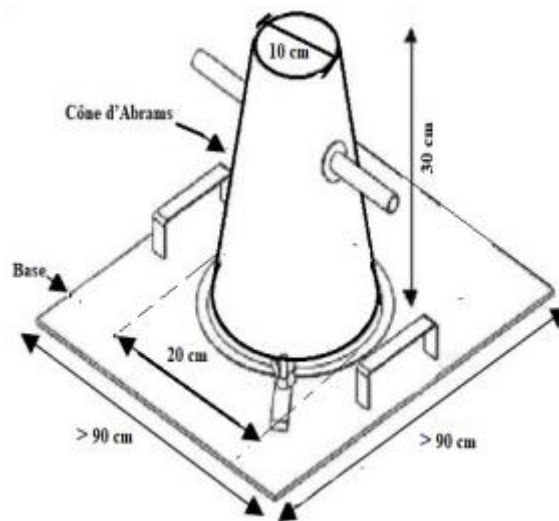


Figure 3-3 : Cône d'abrams

On peut classer les résultats d'écoulement au cône d'abrams en trois (03) catégories comme le montre le tableau suivant.

Tableau 3-4 : Classification des BAP selon le domaine d'application. [38]

| Classe | Etalement | Domaine d'application de BAP |
|--------|-----------|---|
| SF1 | 550-650 | <ul style="list-style-type: none"> - Structures non peu ferraillées, béton coulé à partir du haut (ex. les dalles) : - Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels) : - Petites section (ex. les piles et les fondation profondes). |
| SF2 | 660-750 | <ul style="list-style-type: none"> - La majorité des applications. |
| SF3 | 760-850 | <ul style="list-style-type: none"> - Applications verticales : - Structures trop ferraillées : - Coulage à partir du dessous du coffrage : - Structures de forme complexe. |

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

Cet essai est destiné à étudier la mobilité du béton eu milieu confiné, en testant la capacité de passage du mélange à travers un entonnoir en forme de V dont les dimensions sont définie (figure3.4). Ce temps d'écoulement est un critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant.

Il s'agit de remplir l'entonnoir de béton, puis mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit la lumière par l'orifice. [85]

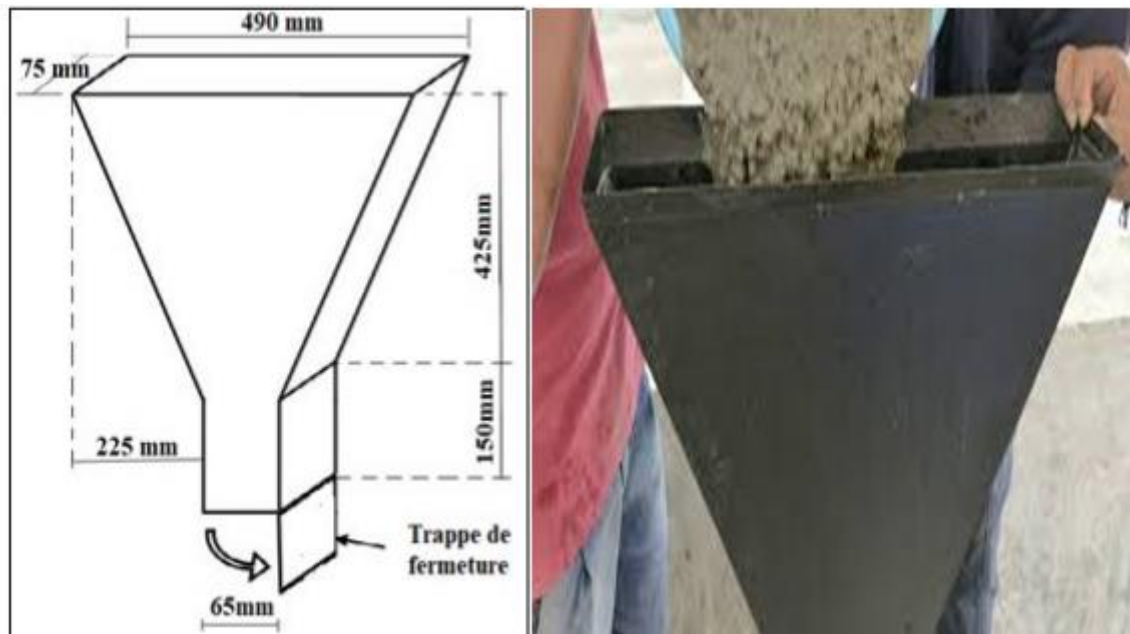


Figure 3-4 : Essai V-funnel. [38]

3.4.1.3 Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L permet de tester la mobilité au milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir le béton dans la partie vertical d'une boîte en forme L (figure 3.5) Ensuite retirer la trappe ce qui provoque l'écoulement du béton dans la partie horizontale à travers une série d'armature formé de trois barres d'armatures de diamètre de $\phi 16$ mm. [86]

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $H2/H1$ qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

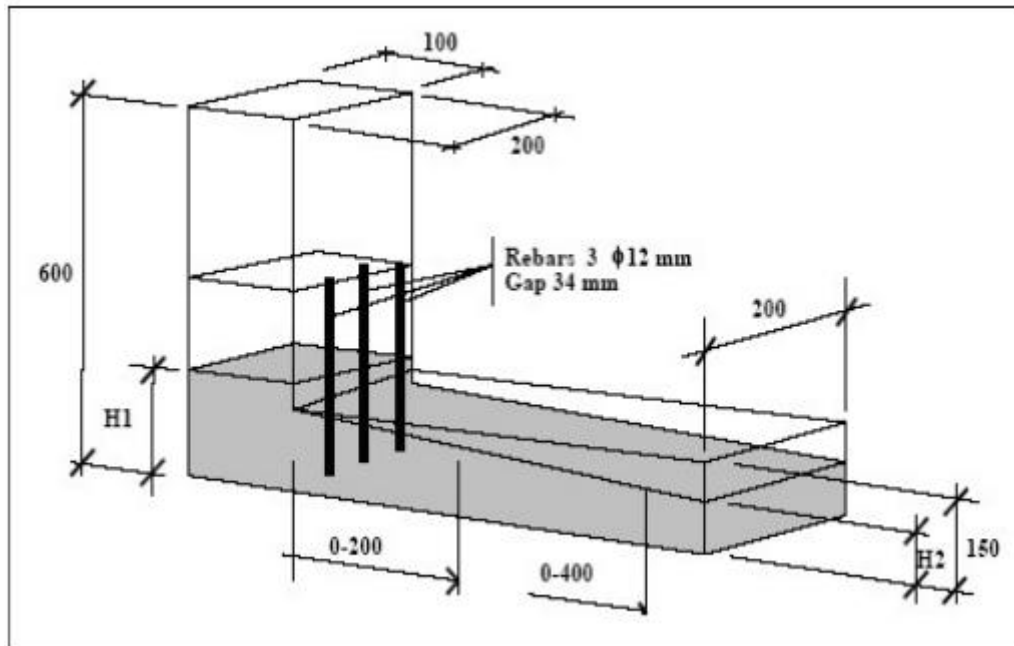


Figure 3-5 : Dimensions de la boîte en L

3.4.1.4 Essai de stabilité au tamis

L'essai permet d'évaluer le risque de ségrégation « statique » et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de 5 kg de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 2 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis (fig 3.6).[87]

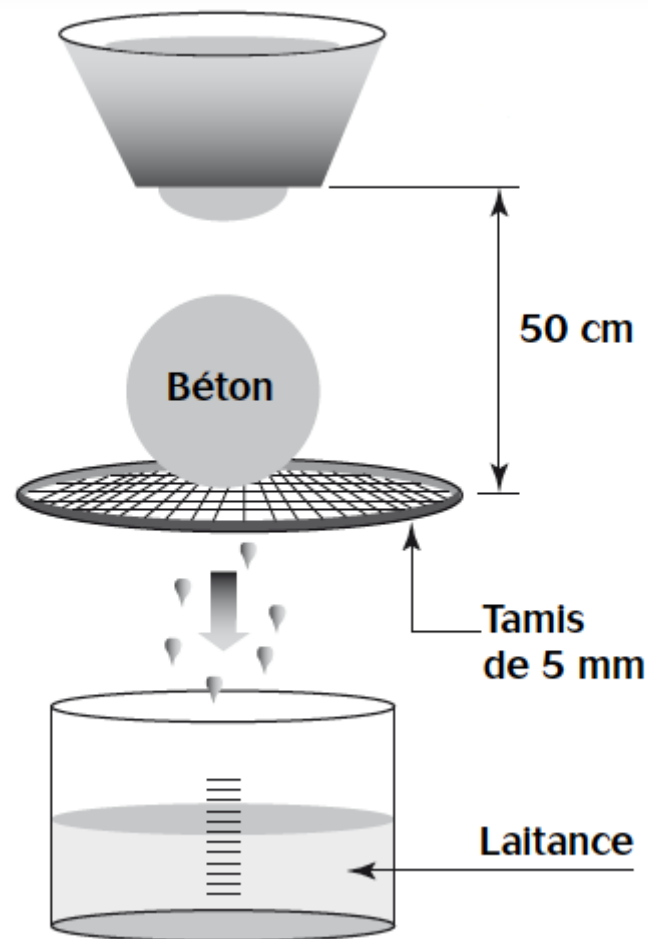


Figure 3-6 : Essai de stabilité au tamis [89]

3.4.2 Essai de rhéologie

Plusieurs variétés de rhéomètres à bétons ont été destinées pour la caractérisation de comportement des bétons à l'état frais. Dans notre étude on a utilisé le rhéomètre à bétons Heidolph- RZR 2102 Control Z.

Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon Vane à quatre pales de 15 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 30x30cm, présenté sur la figure 3.7. Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. [88].



Figure 3-7 : Rhéomètre HeidolphRZR 2102. [88]

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 [87].

Le principe de l'essai est de versé le BAP préparé dans le récipient, ensuite fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier puis démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié à l'aide du logiciel.

3.5 Essais du béton à l'état durci

3.5.1 Résistance à la compression

La qualité du béton est liée à la mesure de résistance à la compression, cette dernière dépend directement de la résistance de la pâte de ciment la résistance à la compression est déterminée conformément à la norme NF EN 12390-3.

L'essai de résistance à la compression (figure 3.8) s'effectue sur une presse de capacité de 3000 KN, on utilise des éprouvettes cubiques ($15 \times 15 \times 15$) cm³ de l'âge de 3, 7, 14 et 28 jours à une vitesse de 0.5 KN/s. [90]

La résistance en compression calculée est la moyenne des résistances obtenues sur trois éprouvettes.



Figure 3-8 : Dispositif de l'essai de compression simple. [82]

3.5.2 Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion (figure 3.9) se réalise sur des éprouvettes ($7 \times 7 \times 28$) cm³. L'essai est réalisé sur une presse de flexions trois (03) points de 3000 KN de capacité. [91]



Figure 3-9 : Essai de traction par flexion. [38]

La valeur de résistance à la flexion finale est la moyenne trois résultats trouvé. Cette valeur est calculée par la formule :

$$\sigma_t = \frac{1.8.P.L}{2.a^3}$$

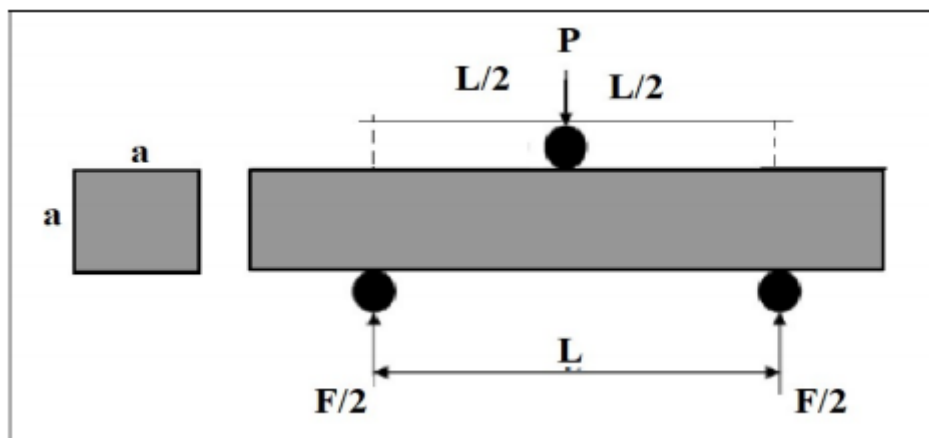


Figure 3-10 : Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points. [38]

3.6 Durabilité

3.6.1 Absorption capillaire

Un béton plus durable est un béton non poreux, pour étudier la porosité du béton on à réaliser l'essai d'absorption capillaire (figure 3.11) qui consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes des bétons sans pression hydraulique.

Les éprouvettes ont été déposées dans l'eau sur une hauteur maximale de 5 mm, pour chaque mesure les éprouvettes sont sorties de 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. [92]



Figure 3-11 : Essai d'absorption capillaire.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié les caractéristique des divers matériaux (sable, ciment, adjuvant...) et aussi la méthode de formulation de BAP ainsi que les différents essais à l'état frais tel que essai d'ouvrabilité et de rhéologie, des essais à l'état durci comme la résistance à la compression et d'autres essais de durabilité comme l'absorption capillaire.

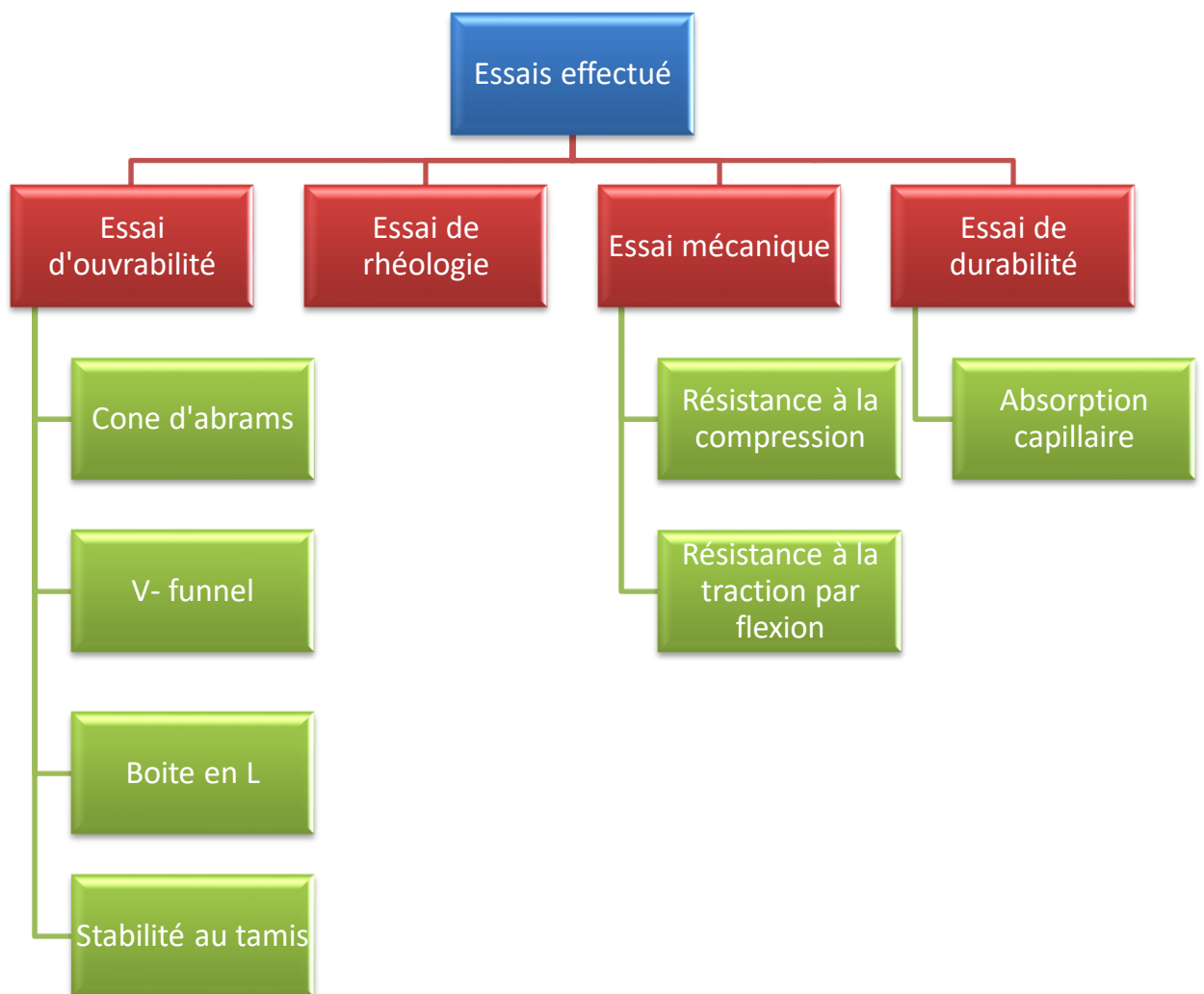


Figure 3-12 : Programme expérimental pour les essais prévus.

CONCLUSION GENERALE

D'après les études qu'on a citées dans cette recherche bibliographique sur l'effet des fines issues de sable de concassage ; on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation des adjuvants fluidifiants et additions minérales présente un intérêt majeur pour donner de meilleures performances rhéologiques et mécaniques du béton.
- Les résistances des BAP augmentent avec l'accroissement de pourcentage des fines issues de sable de concassage à certaines limites avec des exceptions.
- Le type et le dosage du superplastifiant influent sur la rhéologie.
- Le dosage élevé du filler calcaire augmente l'étalement du BAP et diminue le temps d'écoulement.
- L'utilisation des fillers calcaires dans la confection des BAP a un effet positif et négatif pour l'absorption par capillarité.
- Les BAP à base de filler calcaire sont plus résistants à la pénétration de gaz que les BV à base de filler calcaire.
- Les fines issues de sable de concassage ont un effet favorable au retrait des BO et des BAP.
- La fluidité du béton ordinaire augmente avec l'augmentation de la ration de filler calcaire.

- L'accroissement de pourcentage des fines issus de sable de concassage améliore les paramètres rhéologiques des bétons ordinaires et des bétons autoplacants avec certaines exceptions.
- Les fillers calcaires ont un effet avantageux sur l'absorption capillaire des BO, par contre l'absorption par immersion affecté négativement.
- L'augmentation de taux de fine à une certaine limite augmente la densité des BO et des BAP.

Références bibliographiques

- [1] EN 1262-3 Granulat pour béton mars 2009
- [2] Caractéristiques et types de granulats février 2018
- [3] Gérard sustrac. vive la terre. Atlantica, 2011. p.200
- [4] Meziane H. (2016). Etude des propriétés mécanique et durabilité du béton à base de sable de concassage. Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb - Blida 1.
- [5] Paul M., Godoy H. (2020) .Production mondiale de sable et de gravier par pays 2014-2019.
- [6] Madani A. L'acceptabilité sociale des projets miniers en Algérie: cas de Ain Defla et Bejia. Université Djilali BounaamaKhemis Miliana – Algérie.
- [7] Beixing., Wang J., Zhou M. (2009). Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low and high-strength concretes. *Construction and Building Materials* ; 23: 2846-2850.
- [8] 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.
- [9] Okamura H., Ozawa K. (1995). Mix design for self-compacting concrete. *Concrete library of JSCE*, N° 25, pp 107-120.
- [10] Okamura H. (1999). Self-compacting concrete, high performance Concrete. *Social System Institute, Concrete. Int. 19 (7) 50-54, Tokyo (in Japanese)*.
- [11] Okamura H., Maekawa K., Ozawa K. (1999). High performance concrete. First ed. *Gihouda Publishing Co, Tokyo*.

- [12] 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.
- [13] Okamura H., Ouchi M. (1998). Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials* 1, 14.
- [14] 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.
- [15] De Larrard F. (2000). *Structures granulaires et formulation des bétons*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [16] 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° 194.8*
- [17] Felekoglu B. (2007).Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), *Resources, Conservation and Recycling*, 1-22.
- [18] 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.
- [19] Bosiljkov V.B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, *Cement and Concrete Research*, 33, 1279–1286.
- [20] Felekoglu B., (2006). A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*,1-9.
- [21] Sonebi M., (2004).Self-Compacting Concrete Using Ground Granulated Blastfurnace Slag in Hot Climate. *The Annual conference Concrete Technology and Corrosion Protection Conference*, Dubai.

- [22] El Hilali A. (2009). Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants : influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 200p.
- [23] 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 selfcompacting concrete, Three-Day International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, Toronto, CANADA.
- [24] 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.
- [25] Benna Y.(1998). Valorisation du sable de concassage, 1er colloque maghrébin en génie civil, Algérie, Beskra.
- [26] Zaitri R., bedrina M., Dif F., Guetaf Y.(2015). Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base granulats recyclés. Rencontres universitaires de génie civil.
- [27] Chaid R., Jauberthie R., et Boukhaled A.,(2010). Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. Laboratoire des matériaux minéraux et composites. Rencontres universitaires de génie civil.
- [28] Kenai S., Menadi B. (2005). Use of sand from residues of aggregates quarries in concrete, Beijing, China.
- [29] Skender Z.(2009) Durabilité du béton à base de sable de concassage. Mémoire de magistère, sous la direction de Pr Bali Abderahim, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique et Pr kenai Said, Professeur à l'université Saad Dahleb de Blida.
- [30] Bonavetti V.L., Irassar E.F., The effect of stone dust content in sand, Cement and concrete research. vol. 24, No. 3; pp-590, 1994.
- [31] Westerholm M., Lagerblad B., Forssberg E. (2007). Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates. Materials and Structures; 40:615–625.

- [32] Safiddine S. (2018). Etude des propriétés rhéologique et mécanique du béton a base de sable de concassage . thèse de doctorat .université de Blida 1.
- [33] 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.
- [34] 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
- [35] Bellifa S; Gomari F; Amine M ,Boukli H ; Taleb O .(2014). Influence des fillers calcaires sur la porosité et la distribution porale des parties autoplçants. *Laboratoire eau et ouvrage .Université telemcen*
- [36] Conference: Séminaire International, Innovation &valorisation en génie civil &materiaux de construction invaco2 , At Rabat, Morocco .Influence des sables de concassage à différents taux de filler sur les performances mécaniques des bétons. November 2011.
- [37] Meziani M, Chelouah N .Comportement des bétos autoplçants : Effet du type de l'addition mineral .Université A/Mira, Béjaïa, Algérie.
- [38] Benyamina S. (2020).Performance des bétons autoplçants à base de sable de concassage.Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb - Blida 1.
- [39] Azrar T. (2018).Influence du PH sur les propriétés physico-mécaniques d'un morierautoplçant . *Matériaux en génie civil diplôme master 2. Université Akli Mouhnd Oulhadje- Bouira.*
- [40] Bouhanou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki et yahia A.(2008). Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplçant à l'état frais .pp-1-20.
- [41] Behim M et Boucetta Tahar A. Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplçants .laboratoire Matériaux Géo – Matériaux et Environnement - Université Badji Mokhtar. Annaba.

- [42] Khatib J.M., Menadi B., Kenai S. (2009). Effect of cement type on strength development of mortar containing limestone fines. Excellence in concrete construction through innovation, limbachiya , Taylor et Francis group, London, ISBN 978-0-415-47592-1.
- [43] Menadi B. (2008). Performance du mortier et béton à base de filler calcaire. Thèse de doctorat d'état, Département de Génie Civil, université Saad Dahleb de Blida.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Ghemouti .Y (2002) Effet des ajouts cimentaires ultrafines sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du bétons . mémoire de magister, université Boumerdes.
- [47] Maldji .S. (2017) Effet du mode d'incorporation des fillers calcaires sur les propriétés des bétons . mémoire de master , université de Boumerdes.
- [48] Hadj Sadok A. (2004). Durabilité des mortiers à base de ciment au calcaire. Mémoire de magistère, sous la direction de Pr Kenai. Said, département de Génie Civil, Université de Saad Dahleb Blida.
- [49] 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.
- [50] Donza H., Cabrera O., Irassar E.F. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate,. Cement and Concrete Research 32; 1755–1761.
- [51] 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.

[52] Ferkous S., Houari H., Bensebatu S.E., guemmdi Z. (2005). Mécanique des bétons sous conditions locale : paramètres de compositions . Lobaratoire matériaux et durabilité des constructions ,université Mentouri , constantine ,Algerie.

[53] Gibbs j.c and Zhu .w .(1999).Streth of handmed self-compacting concrete . Proceeding first international pilem Symposiumonself-compacting concrete (pro7) ;Stockholm Suede,pp-199-209.

[54] B.felkoglu.(2007). Utilisation of high volumes of limentone quarry waster in oncrete industry (self-compactiongconcete case) . Resource ; conservation and Recycline S1 270-791.

[55] Nibkini . M ; Beygi M.H.A ; Kezeri M.T ; Vasaghi A j ; Rabbani F ; Rahmani E and Rahim S . (2014) .A comprehensive intestigation-into the effect of water to cement ratio and pawder content on mechanical properties of self – compacting concrete construction and building materials pp 69-80.

[56] R'mili et M .benougdou .(2012). Valorisation du sable de désert dans la composition des bétons autoplaçants. laboratoire de génie civil. Ecole nationale d'ingénieurs de tunis. Université tinis El Manar ; Ecole supérieure des sciences et techniques de tunis,université de tunis , tunisie.

[57] Boudra .S. (2014) . Contribution à la modélisation du retrait des bétons .majister en génie civil ; université constantine.

[58] Assié S. (2004). Durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse.

[59] Kenai S., Menadi B., Attar A., Khatib J. (2008). Effect of crushed limestone fines on strength of mortar and durability of concrete.ICCBT , A-(18):pp205-216.

[60] Parra C ., Valcuende M., Gomez F . (2011) .Spelttingtemsilestreth and modulus of elastieityof self . compacting concrete .construction and bulding materials 25 pages 201-207.

- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Bouhamou N., BelasN., Mesbah H., Jauberthie R., Ouali A et Mebrouki A. (2009). Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton autoplaçant à base de matériaux locaux algériens. Publié par les Presses scientifiques du CNRC Rev. can. génie civil. 36: 1195–1206.
- [65] Loukili A. (1996). Etude du retrait et du fluage des bétons à Ultra Haute Performances. Thèse de troisième cycle, école Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, France.
- [66] 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.
- [67] Tsivilis S., Batis G., Chaniotakis E., Grigoriadis Gr., Theodossis D.(2000). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. Cement and Concrete Research ,30:1679– 1683.
- [68] Celik T., Marar K. (1996) .Effect of crushed stone dust on some properties of concrete. Cement and Concrete Research. 26: 1121–1130.
- [69] Menadi .B ., Kenai. S., Khatib.J., Ait-mokhtar.A (2009) . Strength and durability of ronaete incorporating crushed limenstone sand ; construction and bulding Materials 23, 625, 633.

[70] Hadjoudja M., Bedrina M., (2007) Influence des fillers des déchets des briques sur la durabilité du béton de sable de dunes, Colloque CMEDIMAT 2005.

[71] Gibbs J.C., Zhu W.J. (1999). Strength of hardened self-compacting concrete. Stockholm; Suede; pp.199-209.

[72] Skender Z., Bali A and Kettab R. (2019). Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. European Journal of Environmental and Civil Engineering.

[73] Boel V. (2006). Microstructure of self-compacting concrete in relation with gas permeability and durability aspects. PhD thesis, Ghent University, Belgium, p. 320.

[74] Zhu W., Quinn J., Bartos P.J.M. (2001). Transport properties and durability of selfcompacting concrete. Proceedings of second International Symposium on Self Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458.

[75] 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.

[76] Benyamina S., kamali-bernard S., Kenai S., Menadi B. (2018). Etude de la résistance la pprosité, et migration des ions chlorures des BAP à base de sable de concassage. département de science de la matière, université de djilali bounaama khmis milana

[77] Siad H., Kamali bernard S., Mesbahi H.A., mouli M et khelifi H.(2012). Influence du type d'addition minérale sur les propriétés de transfert des bétons autoplaçants. université de Bouira,Algerie

[78] Tahar Ali – boucetta (2014). Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances. thèse doctorat université de annaba.

[79] Persson B. (2003). Sulphate résistance of self-compacting concrete ;cement and concrete research, 33,pp-1933-1938

- [80] RisselKhelifa M (2019) .Effet de l'attaque fulfatique externe sur la durabilites des bétons autoplaçants . université de constantine.
- [81] NF P 15-471. (1990). Méthode d'essais des ciments, détermination des résistances mécaniques, Paris.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] NF EN 12350-2 Avril 2012 Essai pour béton frais
- [85] NF EN 12350-9 Essai d'écoulement à l'entonnoir en V (Vfunnel)
- [86] NF EN 12350-10 novembre 2010 Essai pour béton frais
- [87] NF EN 12350-11 novembre 2010 Essai pour béton frais
- [88] Yahoui W (2018). Durabilité du béton autoplaçant en climat chaud . Thèse de doctorat, Université Saad Dahleb - Blida 1
- [89] Koehler E., Fowler D., Ferraris C., Amziane S. (2006). New portable rheometer for fresh self consolidating concrete, ACI Materials Journal, Vol 233, pp97-116.
- [90] NF EN 12390-3 Essais de compression de béton
- [91] NF EN 12390-5 Essais de flexion
- [92] NF EN 13057 – Détermination de l'absorption capillaire, AFNOR

