

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche**  
**scientifique**

**Université Kasdi Merbah - Ouargla**  
**Faculté des Sciences Appliquées**  
**Département: Génie civil et hydraulique**

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**Doctorat / LMD**

Spécialité: Génie civil

Option: Structures

Titre:

**Contribution à l'étude de durabilité des bétons**  
**autoplaçants en zones arides**

Présenté par:

**ABDI Khalil**

Soutenue publiquement le 04/07/2024

***Devant le jury composé de:***

<b>ABANI Said</b>	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>Université de Ouargla</i>	<i>Président</i>
<b>KEBAILI Nabil</b>	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>Université de Ouargla</i>	<i>Directeur de thèse</i>
<b>BELFERRAG</b> Allaoua	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>Université de Ouargla</i>	<i>Co- Directeur de thèse</i>
<b>OULHACI Dalila</b>	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>Université de Ouargla</i>	<i>Examinatrice</i>
<b>MANI Mohamed</b>	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>Université de El oued</i>	<i>Examineur</i>
<b>LOGBI Abdelaziz</b>	<i>Maître de Conférences (A)</i>	<i>Université de El oued</i>	<i>Examineur</i>
<b>DJOUHRI</b> Mohamed	<i>Maître de Conférences (B)</i>	<i>Université de Ouargla</i>	<i>Invité</i>

**Année Universitaire: 2023/2024**

# Dédicace

---

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, Abdallah, et de mon grand-père, El-Boukhari, qui nous ont quittés mais restent toujours dans mon cœur et mes pensées.*

*À ma chère mère, Khedidja, pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille. À mes frères et sœurs, Mohamed, Sara, Ibtissam, Boubaker, et Amina, pour leur encouragement tout au long de ce parcours.*

*Je tiens également à dédier ce travail à tous mes amis, qui ont toujours été à mes côtés, et à moi-même, pour tous les efforts et le dévouement investis dans cette recherche. À tous ceux qui m'ont tendu la main durant tout mon parcours éducatif, je vous exprime ma gratitude sincère.*

*Ce travail est pour vous tous.*

*Khalil ABDI.*

# Remerciements

---

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à la communauté universitaire de l'Université d'Ouargla, en particulier au département de génie civil et hydraulique, comprenant les enseignants et le personnel à leur tête le professeur BENTABA Mohamed, ainsi qu'à nos précieux superviseurs qui nous ont apporté leur soutien et leurs conseils. Que Dieu les bénisse pour leurs efforts et leur dévouement à nous guider tout au long de notre voyage académique.*

*Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance aux membres du jury, Monsieur ABANI Said (Président), Monsieur KEBAILI Nabil (Promoteur), DJOUHRI Mohamed (CO-Promoteur), Monsieur BELFERRAG Allaoua (Examineur), Madame OULHACI Dalila (Examinatrice), Monsieur MANI Mohamed (Examineur) et Monsieur LOGBI Abdelaziz (Examineur), d'avoir accepté d'examiner cette thèse, pour leurs observations précieuses et leur encouragement à poursuivre la recherche.*

*Je remercie spécialement mes collègues et amis qui m'ont soutenu et encouragé, en particulier les enseignants de l'Université de Souk Ahras. Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, même par un mot gentil ou un conseil, à la réussite de ce travail de recherche.*

*Je suis ravi de témoigner ma profonde reconnaissance envers ma famille, qui a été un soutien inestimable et une source d'inspiration tout au long de ce cursus académique.*

*En conclusion, je tiens à exprimer ma gratitude sincère envers tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de ce modeste travail.*

*Je prie Allah que ce travail soit bénéfique pour le savoir et même pour la société.*

*Louange à Allah, le Seigneur de l'univers.*

# Résumé

Cette recherche étudie le béton autoplaçant (BAP) en utilisant des sables de dunes et des sédiments de dragage (argile calcinée) comme substituts du sable concassé et du filler calcaire. L'étude a révélé que le remplacement de 50% du sable concassé par des sables de dunes améliore les propriétés rhéologiques mais réduit la résistance mécanique, tandis que l'ajout de 50% de sédiments de dragage renforce la résistance mécanique tout en diminuant la performance rhéologique. La combinaison de 50% de sables de dunes et de 50% de sédiments a donné des résultats optimaux, améliorant à la fois la durabilité et la résistance mécanique.

**Les mots clés :** Béton autoplaçant (BAP), Sable de dunes, Sédiments de dragage, Durabilité, Zones arides.

## Abstract

This research examines self-compacting concrete (SCC) using dune sands and dredged sediments (calcined clay) as substitutes for crushed sand and limestone filler. The study found that replacing 50% of crushed sand with dune sands improves rheological properties but reduces mechanical strength, while adding 50% dredged sediments enhances mechanical strength but lowers rheological performance. Combining 50% dune sands and 50% sediments yielded optimal results, improving both durability and mechanical strength.

**Keywords:** Self-Compacting Concrete (SCC), Dune Sands, Dredged Sediments, Durability, Arid Zones.

## ملخص

يدرس هذا البحث استخدام الخرسانة ذاتية الدمك (BAP) باستخدام رمال الكثبان الرملية والرواسب المجروفة (الطين المكلسن) كبديل للرمال المكسر والحشو الجيري. كشفت الدراسة أن استبدال 50% من الرمل المكسر برمال الكثبان يحسن الخصائص الريولوجية ولكنه يقلل من القوة الميكانيكية، في حين أن إضافة 50% من الرواسب المجروفة تعزز القوة الميكانيكية مع تقليل الأداء الريولوجي. وقد أظهرت النتائج أن الجمع بين 50% من رمال الكثبان و50% من الرواسب يحقق أفضل النتائج، حيث يحسن كل من المتانة والقوة الميكانيكية.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة ذاتية الدمك، رمال الكثبان، الرواسب المجردة، المتانة، المناطق القاحلة.

# Liste des figures

---

<b>Figure 1.1:</b> Composition d'un béton autoplaçant.....	6
<b>Figure 1.2:</b> Illustration de l'effet filler dans les BAP.....	10
<b>Figure 1.3:</b> L'effet du superplastifiant sur les particules de béton autoplaçant.....	14
<b>Figure 1.4:</b> Phénomène de blocage des gros granulats en zones confinés.....	15
<b>Figure 1.5:</b> Diminution du volume de gravillon à 50 % de sa densité.....	16
<b>Figure 1.6:</b> Concept d'excès de pâte : la pâte occupe les espaces vides (1) et éloigne les granulats (2).....	17
<b>Figure 1.7:</b> Essai d'étalement au cône (slump flow).....	20
<b>Figure 1.8 :</b> V-Funnel dimensions en (mm).....	21
<b>Figure 1.9 :</b> Essai de la boîte en L (L-box test).....	22
<b>Figure 1.10 :</b> Test du J-Ring.....	23
<b>Figure 1.11:</b> Test de la stabilité au tamis.....	24
<b>Figure 1.12:</b> Essai a la boîte en U (U-BOX test).....	25
<b>Figure 1.13:</b> Appareil rhéomètre.....	25
<b>Figure 1.14:</b> Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV.....	27
<b>Figure 2.1 :</b> Durabilité.....	30
<b>Figure 2.2 :</b> Fissuration de peau du béton.....	34
<b>Figure 2.3 :</b> La perte en poids des BAP en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.....	38
<b>Figure 2.4 :</b> Les processus suggérés pour l'agression des sulfates de sodium... ..	43
<b>Figure 2.5 :</b> Processus suggérés pour l'agression des sulfates de magnésium... ..	44
<b>Figure 2.6:</b> Changements du poids des spécimens plongés dans la solution de sulfate de sodium (béton d'une résistance de 50 MPa).....	45
<b>Figure 2.7 :</b> Changement de la masse des spécimens plongés dans le mélange de sulfate de sodium ( $Na_2SO_4$ ).....	46
<b>Figure 2.8:</b> La résistance à la compression des BAP plongés dans un mélange à 5 % de $Na_2SO_4$ .....	47
<b>Figure 2.9:</b> Variation du poids des BAP plongés dans le mélange à 5 % ( $MgSO_4$ ). .....	47
<b>Figure 2.10:</b> La résistance à la compression des BAP plongés dans la préparation à 5 % ( $MgSO_4$ ).....	48
<b>Figure 2.11 :</b> Le processus de carbonatation de l'hydroxyde de calcium.....	50
<b>Figure 2.12 :</b> Profondeur de carbonatation après 9 mois.....	50
<b>Figure 2.13 :</b> Progressions des niveaux d'absorption de $CO_2$ rapide au fil du temps.....	52
<b>Figure 2.14:</b> Profondeur d'absorption de $CO_2$ naturelle des BAP étudiés, après 15 mois à l'air ambiant du laboratoire.....	52
<b>Figure 2.15:</b> Développement de la profondeur de carbonatation accélérée des bétons.....	53
<b>Figure 3.1 :</b> le sable.....	57

<b>Figure 3.2</b> : Profils granulométriques de deux sables dunaires .....	58
<b>Figure 3.3</b> : Formes de dunes. A: croissants dunaires; B: dunes en parabole; C: dunes allongées.....	60
<b>Figure 3.4</b> : Etalement des BAP étudiés .....	62
<b>Figure 3.5</b> : Essai d'entonnoir en V des BAP étudiés .....	62
<b>Figure 3.6</b> : Stabilité au tamis (GTM screen) des BAP étudiés.....	63
<b>Figure 3.7</b> : Résistance à la compression de group A des BAP étudiés .....	63
<b>Figure 3.8</b> : Résistance à la compression de group B des BAP étudiés .....	64
<b>Figure 3.9</b> : Résistance à la traction des BAP étudiés .....	64
<b>Figure 3.10</b> :Essais à l'état frais (étalement, boîte en L, stabilité au tamis) .....	65
<b>Figure 3.11</b> : Essai de résistance à la compression .....	66
<b>Figure 3.12</b> : Test de résistance à la traction .....	66
<b>Figure 3.13</b> : Engin mécanique de dragage.....	69
<b>Figure 3.14</b> : Schéma du protocole à suivre pour étudier la faisabilité de utiliser un sédiment de dragage comme composant d'un matériau cimentaire...	72
<b>Figure 3.15</b> : Essai d'écoulement Mini- cône et la densité apparent des échantillons étudier.....	73
<b>Figure 3.16</b> : Effort de la flexion et de la compression.....	73
<b>Figure 3.17</b> : Gain d'endurance en compression des mortiers autoplaçants analysés.....	73
<b>Figure 3.18</b> : L'apparition de deux types d'agrégats légers liants avec des densités de particules différentes .....	74
<b>Figure 3.19</b> : Valeurs d'étalements des quatre BAP.....	76
<b>Figure 3.20</b> : Les taux de remplissage des quatre BAP.....	76
<b>Figure 3.21</b> : Taux de ségrégation des quatre BAP.....	77
<b>Figure 3.22</b> : Résistances mécaniques à la compression des différents BAP...	77
<b>Figure 3.23</b> : Variation de la masse des échantillons immergés dans l'eau douce.....	78
<b>Figure 3.24</b> : Fluctuation de la masse des BAP étudiés plongés dans la préparation de sulfate de sodium .....	78
<b>Figure 3.25</b> : Diminution de la masse des BAP ayant 90 jours et plongés dans la préparation $H_2SO_4$ .....	79
<b>Figure 4.1</b> : Sable de dunes utilisé.....	82
<b>Figure 4.2</b> : Résultats de l'examen granulométrique des granulats utilisés .....	84
<b>Figure 4.3</b> : La Vase extrait du barrage d'Aïn Dalia.....	85
<b>Figure 4.4</b> : Étapes de préparation des sédiments de dragages (Vase).....	86
<b>Figure 4.5</b> : Distribution granulométrique des additions minérales.....	87
<b>Figure 4.6</b> : Medaflow 30.....	88
<b>Figure 4.7</b> : Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	93
<b>Figure 4.8</b> : Essai de la boîte en L.....	94
<b>Figure 4.9</b> : Essai de stabilité au tamis .....	95
<b>Figure 4.10</b> : Essai de la résistance à la compression.....	96
<b>Figure 4.11</b> : Un schéma illustratif d'un test de flexion selon trois et quatre points .....	97

<b>Figure 4.12:</b> Essai de traction par flexion.....	97
<b>Figure 4.13:</b> Les éprouvettes immergées dans la solution acide ( $H_2SO_4$ ).....	99
<b>Figure 4.14:</b> Les éprouvettes immergées dans la solution sulfate ( $Na_2SO_4$ ).....	100
<b>Figure 4.15 :</b> Test de pénétration rapide du chlorure sur les BAP étudiés.....	102
<b>Figure 4.16:</b> Géométrie de l'essai d'absorption capillaire .....	103
<b>Figure 4.17:</b> Test d'absorption capillaire.....	104
<b>Figure 4.18:</b> Schéma du Processus Expérimental.....	105
<b>Figure 5.1:</b> L'impact du sable de dunes sur les valeurs d'étalement des mélanges de béton autoplaçant étudiés.....	109
<b>Figure 5.2:</b> L'influence du sable des dunes sur les propriétés de remplissage et de passage dans le test de la boîte en L.....	110
<b>Figure 5.3:</b> L'influence du sable des dunes sur la résistance à la ségrégation..	111
<b>Figure 5.4:</b> L'influence du sable des dunes sur la résistance à la compression du BAP.....	112
<b>Figure 5.5:</b> L'influence du sable des dunes sur la résistance à la traction du BAP.....	114
<b>Figure 5.6:</b> L'impact du Sédiment de dragage (Vase) sur les valeurs d'étalement des mélanges de béton autoplaçant étudiés.....	116
<b>Figure 5.7:</b> L'impact du Sédiment de dragage (Vase) sur les propriétés de remplissage et de passage dans le test de la boîte en L du BAP étudiés.....	117
<b>Figure 5.8:</b> L'influence du Sédiment de dragage (Vase) sur la résistance à la ségrégation du BAP.....	118
<b>Figure 5.9:</b> L'influence du Sédiment de dragage (Vase) sur la résistance à la compression du BAP.....	119
<b>Figure 5.10:</b> L'influence du Sédiment de dragage sur la résistance à la traction du BAP.....	121
<b>Figure 5.11:</b> Observation visuelle des échantillons immergés pendant 8 semaines dans une solution de 5% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).....	123
<b>Figure 5.12:</b> Perte de masse pour les BAP de l'âge de 28 jours immergés dans une solution à 5 % d'acide sulfurique en fonction de temps.....	124
<b>Figure 5.13:</b> Évaluation de la résistance à la compression des échantillons de BAP immergés dans la solution de 5 % $H_2SO_4$ .....	126
<b>Figure 5.14:</b> Contrôle visuel d'échantillons immergés pendant 200 jours dans une solution à 5% de sulfate de sodium ( $Na_2SO_4$ ).....	128
<b>Figure 5.15:</b> Perte de masse pour les BAP de l'âge de 28 jours immergés dans une solution à 5 % de sulfate de sodium en fonction de temps.....	129
<b>Figure 5.16:</b> Évaluation de la résistance à la compression des échantillons de BAP immergés dans la solution de 5 % $Na_2SO_4$ .....	130
<b>Figure 5.17:</b> Charge totale traversant les échantillons de BAP étudiés.....	131
<b>Figure 5.18:</b> Coefficient d'absorption capillaire (à 24 h) des BAP étudiés.....	133
<b>Figure 5.19:</b> Les pores visibles à l'œil nu dans les échantillons de BAP étudiés.....	134

# Liste des Tableaux

---

<b>Tableau 1.1:</b> Classification des ciments selon leurs résistances.....	7
<b>Tableau 1.2 :</b> Critères sur les propriétés physiques de filler calcaire.....	10
<b>Tableau 1.3:</b> Critères sur les propriétés chimiques de filler calcaire.....	11
<b>Tableau 1.4:</b> les classes d'étalement de béton.....	19
<b>Tableau 1.5:</b> Utilité des différents essais.....	26
<b>Tableau 4.1:</b> Formulation chimique du ciment employé .....	82
<b>Tableau 4.2:</b> Compositions chimiques des granulats utilisé.....	83
<b>Tableau 4.3:</b> Propriétés physiques des granulats utilisés.....	83
<b>Tableau 4.4:</b> Composition chimique d'additions minérales utilisées.....	86
<b>Tableau 4.5:</b> Caractéristiques physique des additions minérales.....	87
<b>Tableau 4.6 :</b> Caractéristiques d'adjuvant utilisé.....	88
<b>Tableau 4.7:</b> Proportions et compositions des BAP préparés.....	91
<b>Tableau 5.1:</b> Résultats des essais d'état frais pour le béton autoplaçant étudiée.....	108
<b>Tableau 5.2:</b> Résultats des essais d'état frais pour les formulations autoplaçant étudiée.....	115

# Liste des abréviations

---

**BAP** : Béton autoplaçant

**SD** : Sable de dunes

**SC** : Sable carrière

**T** : Témoin

**V** : Vase

**E/C**: Eau/ Ciment

**E/L** : Eau/liant

**CSH**: Hydrates de silicate de calcium

**SSB** : Surface Spécifique de Blaine

**AFGC** : Association Française de Génie Civil

**LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

**SF**: Slump flow

**REF**: Reference

**BO**: Béton ordinaire

**BV**: Béton Vibré

**BHP** : Béton de Hautes Performances

**PZ** : Pouzzolane

**VF**: VASE de barrage Fergoug

**VC** : VASE de barrage Chorfa

**FC** : Filler calcaire

**BOV**: Béton Ordinaire Vibré

**NVC**: Normal vibrated concrete

**SCC**: Self compacting concrete

**CU**: Coefficient d'uniformité

**CC** : Coefficient de courbure

**SCM:** Self-compacting mortar

**SCLAC:** Self compacting lightweight aggregate concrete

**PF:** Perte au feu

**SMCO :** Société des matériaux de construction

**A/C:** Addition / Ciment

**G/S:** Gravier / Sable

**Sp/C:** Superplastifiant / Ciment

**VM :** Variation de la masse

# SOMMAIRE

---

<b>DEDICACE</b> .....	I
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	II
<b>RESUME</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	III
ملخص .....	III
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	IV
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	VII
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	VIII
<b>SOMMAIRE</b> .....	X
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LE BETON AUTOPLAÇANT</b> .....	4
<b>1.1 Introduction</b> .....	4
<b>1.2 Définition du Béton autoplaçant</b> .....	4
1.2.1 Utilisations .....	5
1.2.2 Les avantages du béton autoplaçant .....	5
1.2.3 Les limitations des bétons autoplaçants.....	5
<b>1.3 Les constituants d'un béton autoplaçant</b> .....	6
1.3.1 Le ciment .....	6
1.3.2 Les agrégats.....	8
1.3.3 L'eau .....	8
1.3.4 Les adjuvants .....	9
1.3.5 Les additions minérales .....	9
<b>1.4 Les critères de la composition du BAP</b> .....	11
1.4.1 Un volume de pâte importante .....	11
1.4.2 Une teneur importante en fines ( $\emptyset < 80 \mu\text{m}$ ).....	11
1.4.3 Utilisation de superplastifiants .....	12
1.4.4 Emploi éventuel d'un agent de viscosité pour la rétention d'eau ...	12
1.4.5 Une quantité réduite de gravillon .....	13
<b>1.5 Les approches de formulation des Bétons Autoplaçants (BAP)</b> .....	13
1.5.1 Méthode de formulation japonaise (l'amélioration des Mortiers) .....	14
1.5.2 Approche Suédoise (minimisation de la quantité de pâte) .....	15
1.5.3 Approche française (amélioration de la structure granulaire).....	16
<b>1.6 Propriétés des bétons autoplaçants</b> .....	17
1.6.1 Caractéristiques à l'état frais .....	17
1.6.2 Propriétés à l'état durci .....	25
<b>1.7 Conclusion</b> .....	27
<b>CHAPITRE 2: DURABILITE DU BETON AUTOPLAÇANT</b> .....	28
<b>2.1 Introduction</b> .....	28
<b>2.2 Définition de durabilité</b> .....	28
<b>2.3 Facteurs influençants sur la durabilité</b> .....	30
2.3.1 Porosité .....	30
2.3.2 Le retrait .....	32
2.3.3 Le fluage .....	33

<b>2.4 Les attaques chimiques des bétons</b> .....	34
2.4.1 Actions des acides .....	34
2.4.2 Actions des sulfates .....	38
2.4.3 L'absorption de CO <sub>2</sub> (La carbonatation).....	47
<b>2.5 Essais actuels évaluants la pérennité du béton face aux     attaques chimiques.</b> .....	53
<b>2.6 Conclusion</b> .....	54
<b>CHAPITRE 3 : MAXIMISATION DES RESSOURCES : SABLE DES DUNES ET VASE DANS LA CONCEPTION DU BETON AUTOPLAÇANT</b> .....	55
<b>3.1 Introduction</b> .....	55
<b>3.2 Sable des dunes</b> .....	55
3.2.1 Le sable .....	55
3.2.2 Les dunes .....	58
3.2.3 Utilité du sable des dunes .....	59
3.2.4 <b>Exploitation du sable de dunes dans la composition du         béton autoplaçant</b> .....	60
<b>3.3 La vase (sédiment de dragage)</b> .....	66
3.3.1 Définition .....	66
3.3.2 Composition des sédiments .....	67
3.3.3 Le dragage des sédiments .....	68
3.3.4 L'optimisation des matériaux d'extraction (vase) .....	69
3.3.5 L'exploitation des sédiments issus du dragage (vase) pour la préparation du béton autoplaçant (BAP).....	70
<b>3.4 Conclusion</b> .....	79
<b>CHAPITRE 4: ETUDE EXPERIMENTALE</b> .....	80
<b>4.1 Introduction</b> .....	80
<b>4.2 Les matériaux utilisés</b> .....	80
4.2.1 Le Ciment .....	80
4.2.2 Les granulats .....	81
4.2.3 Les additions minérales .....	83
4.2.4 Les adjuvants .....	86
4.2.5 L'eau de gâchage .....	87
<b>4.3 Travail expérimentale</b> .....	88
4.3.1 <b>L'approche d'élaboration du béton autoplaçant</b> .....	88
4.3.2 Elaboration des BAP .....	88
4.3.3 Essais effectués sur les formulations de BAP préparées .....	91
4.3.3.1 Essais concernant l'état frais .....	91
4.3.3.2 Tests concernant l'état durci .....	94
4.3.3.3 Essais de durabilité .....	97
<b>4.4 Conclusion</b> .....	105
<b>CHAPITRE 5: ÉTUDE DES RESULTATS ET INTERPRETATION</b> .....	106
<b>5.1 Introduction</b> .....	106
<b>5.2 L'influence du Sable des dunes sur les caractéristiques du béton autoplaçant (BAP)</b> .....	106
5.2.1 L'impact du sable de dunes sur les caractéristiques Frais du BAP.....	107
5.2.2 L'effet du sable des dunes sur les propriétés durcies du BAP .....	111

<b>5.3 L'effet du sédiment de dragage (Vase) sur les propriétés du béton autoplaçant (BAP) .....</b>	<b>114</b>
5.3.1 L'effet du Vase sur les propriétés Frais du BAP à base de sable des dunes .....	114
5.3.2 L'effet du Sédiment de dragage (Vase) sur les propriétés durcies du BAP à base de sable de dune .....	118
<b>5.4 Durabilité du béton autoplaçant .....</b>	<b>121</b>
5.4.1 Résistance à l'attaque de l'acide sulfurique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	121
5.4.2 Résistance à l'attaque de sulfate de sodium (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	126
5.4.3 Résistance à la Pénétration Rapide du Chlorure .....	130
5.4.4 Absorption capillaire .....	131
<b>5.5 Conclusion .....</b>	<b>134</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>136</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>138</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>146</b>

# Introduction générale

---

Le sable des dunes joue une grande importance écologique et économique, constituant une source riche en ressources naturelles. Malgré sa valeur exceptionnelle, l'exploitation de ces sables ne reçoit pas suffisamment de considération dans les domaines de la construction et du génie civil. En réalité, les sables de dunes pourraient être la solution aux défis environnementaux et économiques s'ils sont utilisés de manière durable. Il est à noter que l'Algérie regorge de cette ressource naturelle dans ses régions désertiques, ce qui encourage à intensifier les recherches pour trouver des moyens de l'exploiter.

En exploitant ces sables dans l'industrie de la construction, il est possible de réduire la pression sur d'autres ressources naturelles, telles que le sable de rivière, qui subit un déclin en raison de l'exploitation excessive. De plus, l'augmentation des quantités de ces sables peut aggraver le phénomène de désertification, entraînant la perte de sol fertile et des détériorations environnementales. La désertification a des impacts négatifs et graves sur l'environnement, la vie végétale, animale, et constitue un défi majeur pour l'agriculture dans les régions affectées.

Par ailleurs, les barrages constituent un élément essentiel des infrastructures hydrauliques, utilisés pour le stockage de l'eau, la génération d'électricité hydraulique, ainsi que pour d'autres applications. Cependant, ces barrages font face à des défis environnementaux liés aux sédiments accumulés au fond. Les sédiments qui s'accumulent réduisent progressivement la capacité des barrages à retenir l'eau, diminuant ainsi leur efficacité globale. La plupart de ces sédiments est constituée de dépôts de limon et de sédiments naturels résultant du flux d'eau. L'extraction de ces sédiments représente un défi majeur car elle nécessite des mécanismes avancés et coûteux, et peut avoir des impacts environnementaux négatifs. L'argile et les sédiments dragués, s'ils s'accumulent dans les zones environnantes, peuvent affecter la flore et la faune locale et entraîner la pollution des eaux environnantes.

Le béton autoplaçant est une technologie moderne et innovante qui repose sur la capacité inhérente du béton à se fluer et à se répartir uniformément dans les moules sans nécessité de vibration externe. Pour atteindre ce flux lisse, l'utilisation de quantités importantes de particules fines de taille réduite dans la composition du béton est nécessaire.

Le principal objectif de cette étude est d'examiner la faisabilité de l'utilisation ces deux matériaux dans la formation du béton autoplaçant, de bonnes propriétés rhéologiques, mécaniques, une haute durabilité, et visant également à réduire le coût de ce béton tout en préservant l'environnement en réduisant la quantité de ces matériaux utilisés dans des domaines limités en Algérie.

La wilaya d'Ouargla en Algérie, l'une des plus grandes wilayas désertiques, renferme d'énormes quantités de sable de dunes. Cette recherche testera l'efficacité de ces sables en tant que substitut partiel ou total au sable concassé dans la formation du béton autoplaçant.

Le barrage d'Aïn Dalia dans la wilaya de Souk Ahras, l'un des plus grands barrages de l'est algérien, alimente trois wilayas voisines en grandes quantités d'eau, fournissant ainsi d'énormes quantités de sédiments retenus au fond de ce barrage. Dans cette recherche, ces sédiments dragués, traités thermiquement (calcinés), seront utilisés comme substitut partiel ou total aux additifs minérales utilisés (filler calcaire) dans la formulation du béton autoplaçant.

Le travail sur ce sujet est divisé en trois étapes principales :

*Étape 1* : Évaluer l'impact du sable des dunes sur les caractéristiques du béton frais telles que l'étalement, le remplissage et la résistance à la séparation, ainsi que sur les propriétés mécaniques à l'état durci, comme la résistance à la compression et à la traction. En préparant cinq (5) mélanges contenant des proportions variables de ce sable, à savoir BAP T, BAP 25 SD, BAP 50 SD, BAP 75 SD, BAP 100 SD, contenant respectivement 0, 25, 50, 75, et 100% de ce sable, la meilleure pourcentage doit sélectionné.

*Étape 2* : Former cinq (5) mélanges de béton autoplaçant contenant tous une proportion uniforme de sable de dunes et différant par les quantités de sédiments dragués (Vase) ajoutés, à savoir BAP 0 V, BAP 25 V, BAP 50 V, BAP 75 V, BAP 100 V, contenant respectivement 0, 25, 50, 75, et 100% de ces sédiments. L'objectif est d'analyser l'impact de ces sédiments dragués sur les caractéristiques du béton frais et durci, ainsi que d'identifier la proportion optimale de cette substance dans la formulation du béton autoplaçant.

*Étape 3* : Ces essais porteront sur la durabilité après avoir déterminé la proportion optimale de sable des dunes et de sédiments dragués (Vase calciné) dans la formation de BAP. Trois mélanges de base seront préparés : le premier servant de témoin pour les essais et ne contenant aucune proportion de sable de dunes ni de sédiments

dragués, le deuxième contenant la proportion optimale de sable de dunes sans sédiments dragués, et le troisième contenant la proportion optimale de sable des dunes avec la proportion optimale de sédiments dragués. Cela permettra de comparer les effets de ces deux matériaux sur la durabilité du béton autoplaçant dans des facteurs environnementaux hostiles, à travers des essais de durabilité comme les attaques acides et sulfuriques, les essais de pénétration d'ions de chlorure, et l'absorption capillaire.

En conclusion, cette étude vise à encourager l'utilisation de ce type de béton en Algérie, tout en favorisant l'exploitation rationnelle des ressources naturelles abondantes dans ce pays, mais de manière rentable et bénéfique sur les plans économique et environnemental.

# Chapitre 1: Généralités sur le béton autoplaçant

---

## 1.1 Introduction

Le béton autoplaçant se caractérise par une fluidité exceptionnelle et une excellente aptitude au remplissage, tout en maintenant sa stabilité, ses performances mécaniques optimales et sa durabilité. Ces propriétés dépendent étroitement de sa formulation. En effet, les études récentes ont révélé que la formulation du BAP diffère de celle du béton classique, contenant des particules plus fines renforcées par des additifs minéraux et une forte dose de superplastifiant.

C'est pourquoi nous avons consacré ce premier chapitre à la définition du béton autoplaçant, ses domaines d'application, et à ses avantages et inconvénients, en insistant sur la mise en avant de ses composants et les méthodes de formulation dans diverses régions du monde. De plus, nous tenterons d'expliquer Les aspects physiques et résistants de ce type de béton ainsi que les expériences nécessaires qui nous permettant de connaître et de mesurer ces propriétés dans les deux cas, frais et durcis.

## 1.2 Définition du Béton autoplaçant

Le recours au béton autoplaçant (BAP) a vu le jour au Japon vers la fin des années 1980, dans le but d'accroître l'efficacité des travaux de construction, de garantir une homogénéité optimale du mélange avec un béton de haute performance, et de diminuer la nuisance sonore. L'idée de créer le béton autoplaçant (BAP) a émergé suite aux études menées sur le comportement du béton utilisé dans les environnements subaquatiques, notamment pour les infrastructures maritimes. L'ajout d'un agent viscosifiant dans ces formulations visait à renforcer l'adhérence entre les particules de ciment et le superplastifiant, permettant ainsi de maintenir une fluidité optimale sans entraîner de ségrégation. Ce développement visait non seulement à améliorer la maniabilité du béton, mais aussi à garantir des performances homogènes dans des conditions exigeantes [1].

Le BAP est un béton spécial et totalement parfaitement uniforme, qui peut être coulé et mis en œuvre sans nécessiter de vibrations internes ou externes, même dans des structures fortement armées. Un béton est considéré comme "autoplaçant" lorsqu'il est extrêmement fluide et parfaitement stable à l'état frais, sans montrer de

séparation des composants ni d'écoulement excessif. De plus, une fois durci, il offre une résistance mécanique au minimum équivalente à celle du béton conventionnel [2].

### **1.2.1 Utilisations**

Les BAP peuvent être employés à la fois pour la réalisation de structures horizontales et verticales, dans différents types de projets en béton. Le BAP convient à la fabrication de nombreux éléments structurels, tels que les membranes, colonnes, supports, solives, planchers, dalles, revêtements de sol, et fondations, éléments de façade, mobilier urbain, et autres:

- Forte densité d'armatures
- Structures et formes complexes : panneaux, arcs, etc.
- Panneaux minces et de grande élévation : supports de ponts, etc.
- Panneaux intriqués comportant plusieurs réservations ou de vastes ouvertures.
- Conditions architecturales et standards de finition spécifiques.

### **1.2.2 Les avantages des bétons autoplaçants**

- Réduction des nuisances sonores dans le chantier.
- Réduction des coûts liés à l'absence de besoin de vibration et à une diminution du personnel.
- Amélioration de la qualité des parements.
- Possibilité de couler des voiles de grande hauteur sans interruption du bétonnage.
- Réduction du temps nécessaire à l'application du béton sur le site de construction.
- Réduction de la complexité des tâches sur le site de construction.
- Nouvelles options techniques : coulage dans des zones intensément armées, dans des coffrages complexes ou encombrés, rénovation de zones d'accès difficile.
- L'absence de vibration contribue à réduire la séparation entre les particules solides et le liquide, provoquant une diminution de la perméabilité entre le liant et les granulats, notamment dans les sections de transition, améliorant ainsi la durabilité.

### **1.2.3 Les limitations des bétons autoplaçants**

La principale raison qui limite l'utilisation des BAP réside dans la nécessité d'utiliser des superplastifiants et des fines, entraînant ainsi une hausse des coûts. Toutefois, l'utilisation de BAP pour la construction de grandes structures peut être

économiquement avantageuse, car le coût additionnel des additifs est rapidement équilibré par la réduction des coûts de travail et les délais d'exécution [2].

### 1.3 Les constituants d'un béton autoplaçant

Le béton autoplaçant se compose au moins de 6 composants (ciment, sable, gravier, eau, adjuvants et addition ...)

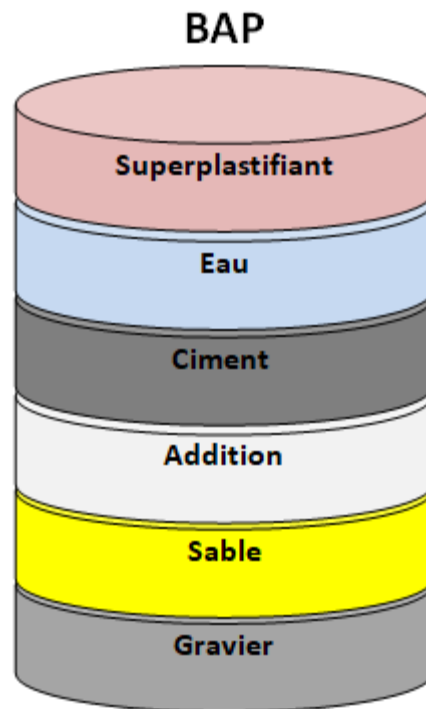


Figure 1.1: Composition d'un béton autoplaçant

#### 1.3.1 Le ciment

Le ciment joue le rôle de liant hydraulique en réagissant avec l'eau, ce qui déclenche son hydratation et son durcissement. Ce processus permet à la pâte, initialement liquide, de se transformer en un solide quasiment insensible à l'eau. Cette solidification découle d'humidification de plusieurs éléments minéraux, notamment les silicates et les aluminates de calcium. Les ciments traditionnels sont principalement composés de clinker, auquel peuvent être associés divers matériaux en fonction du type de ciment, tels que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes ou la pouzzolane naturelle, etc. Ces ajouts visent à altérer certaines propriétés du ciment pour offrir une gamme de produits adaptés à résoudre les divers défis rencontrés lors de la construction, notamment en fonction des conditions environnementales [3].

**Clinker portland (K) :** le produit résultant de la calcination d'une composition à base de roche calcaire et d'argile, dosé et uniformisé, composé principalement de chaux

(CaO), de dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) et d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Cette combinaison est généralement formée de matériaux naturels extraits de carrières, tels que le calcaire, l'argile, la marne, etc. Par mouture, avec l'ajout d'une faible quantité de gypse utilisé comme agent régulateur, le clinker produit les ciments « Portland ». Les composants essentiels du clinker sont au nombre de quatre

\* *Silicate de calcium tricalcique: SiO<sub>2</sub> ,3CaO (ou C<sub>3</sub>S).*

\* *Silicate de calcium bi calcique: SiO<sub>2</sub> ,2CaO (ou C<sub>2</sub>S).*

\* *Aluminate de calcium tricalcique: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , 3CaO (ou C<sub>3</sub>A).*

\* *Tétra calcium aluminate-ferrite: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4CaO , 4CaO (ou C<sub>4</sub>AF).*

- **Classification des ciments**

Les ciments standards sont classés selon leurs résistances mécaniques à la compression, mesurées en MPa après une cure de 28 jours.

La réglementation fixe des seuils inférieurs et supérieurs, et les chiffres correspondants sont affichés ci-dessous (Tableau 1-1):

Tableau 1.1: Classification des ciments selon leurs résistances.

Types de ciments	Résistance à 2 jours(MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Les classes « R », réputées pour leur rapidité, démontrent des propriétés mécaniques plus élevées à des stades précoces. Elles sont particulièrement avantageuses dans des contextes variés tels que le bétonnage en conditions froides, le décoffrage accéléré et la production en préfabrication.

### 1.3.2 Les agrégats

Les **agrégats**, regroupant le sable, les graviers et les cailloux, peuvent être d'origine naturelle ou artificielle, constituant l'ossature du béton. Leur composition, leur morphologie et leur distribution granulométrique exercent un impact notable sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état frais qu'après son durcissement. Cependant, ils doivent demeurer chimiquement stables en contact avec les autres composants. Ainsi, le choix des agrégats revêt une grande importance pour garantir des caractéristiques optimales du béton.

Dans le béton frais, les granulats remplissent l'espace (représentant environ 70 % du volume). De par leur porosité ouverte, ils possèdent la faculté de retenir une quantité d'eau spécifique, créant ainsi un effet d'humidification. Après le durcissement du béton, ces granulats apparaissent comme des éléments solides intégrés, contribuant de manière essentielle à la résistance mécanique et à la stabilité du béton.

Les **agrégats** sont classés en fonction de divers critères:

- Constitution minéralogique : Ils peuvent être distingués selon leur constitution minérale, tels que quartzite, basalte ou calcite.
- Forme ou mode de production: Certains sont des agrégats lisses provenant du dragage des lits de rivières, tandis que d'autres sont des granulats concassés extraits de carrières.
- Taille des grains ou répartition dimensionnelle : Il est essentiel que la distribution des tailles des grains soit bien équilibrée pour permettre aux particules les plus fines de combler les espaces laissés par les grains plus gros. De plus, un rapport optimal entre gravillon et sable favorise une meilleure compacité des granulats [5].

### 1.3.3 L'eau

L'eau occupe une fonction primordiale, voire la plus cruciale, dans le béton, assumant deux fonctions principales :

- Premièrement, elle agit en transformant le ciment en une substance adhésive, dans un processus appelé hydratation du ciment. Cette eau se sature en ions présents dans le ciment, déclenchant diverses réactions qui aboutissent à la solidification du matériau après quelques heures.

- Deuxièmement, elle confère au mélange sable-ciment-granulats une certaine fluidité, permettant ainsi sa maniabilité à l'occasion de la mise en œuvre.

#### 1.3.4 Les adjuvants

Les adjuvants constituent des agents chimiques ajoutés au béton en quantités limitées, généralement en dessous de 5 % du volume global. Ces substances ont pour but d'améliorer certaines caractéristiques du béton, telles que sa résistance, sa durabilité ou sa maniabilité. Il existe différents types d'adjuvants utilisés dans la production du béton [5]:

- *Les retardateurs/accélérateurs de prise* : Les premiers empêchent la formation du CSH, tandis que les seconds accélèrent ce processus.
- *Les plastifiants (ou fluidifiants)* : Ils sont couramment utilisés pour optimiser la maniabilité du béton, ce qui permet de diminuer la quantité d'eau requise à son mélange et augmentant sa résistance en diminuant le rapport E/C.
- *Les superplastifiants* : Ces matériaux, dotés d'une capacité élevée à réduire l'eau, contribuent à accroître la solidité du béton tout en diminuant la quantité d'eau nécessaire de 25 à 35 %, tout en préservant sa fluidité.
- *Les entraîneurs d'air* : Ils contiennent des molécules tensioactives améliorant la résistance du béton au gel.
- *Les hydrofuges* : Ils sont utilisés pour rendre le béton imperméable en arrêtant son absorption capillaire. Certains sont incorporés dans le mélange lors du malaxage, tandis que d'autres sont appliqués sur le béton durci.
- *Les fluidifiants* : Ces macromolécules organiques synthétiques chargées négativement agissent en dispersant les particules de ciment, atténuant les forces de Van der Waals ou en modifiant l'énergie de surface du matériau, ou en induisant des forces de répulsion électrostatique.

#### 1.3.5 Les additions minérales

Pour garantir la constance d'un BAP à l'état frais, il est nécessaire d'y inclure une certaine proportion de fines. Lorsque cette proportion est entièrement occupée par le ciment Portland, le matériau durci dépasse les performances spécifiées. Il est donc judicieux d'utiliser une partie de substances fines, pas autant actives que le clinker et

moins coûteux sur le plan énergétique et environnemental, pour remplir ce volume. Ces ajouts minéraux peuvent être incorporés lors de la fabrication du ciment (ciments composés) ou ajoutés directement au mélange de béton dans la bétonnière [6].

On distingue deux catégories d'additifs en fonction de leur provenance:

- **Les fines inertes** : sont essentielles pour optimiser la densité et l'homogénéité des bétons, surtout dans le cas des bétons autoplaçants qui nécessitent une proportion élevée de particules fines. [5]

- **Filler calcaire** :

Un filler calcaire désigne une poudre minérale résultant de la pulvérisation d'une roche contenant du carbonate de calcium, répondant aux critères de conformité à la réglementation relative aux additifs minéraux à base de calcaire (NFP18-508). Ce terme fait référence au fait que, lorsqu'il est broyé suffisamment finement (voir Tableau 1-2), il s'intègre dans la structure granulaire du ciment (voir Figure 1-2), permettant ainsi de occulter les espaces entre les autres grains de plus grande taille dans le béton. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet de remplissage, conduit à une densification accrue de la structure granulaire, influençant ainsi les caractéristiques du matériau tant à l'état fluide qu'à l'état solidifié. [7].

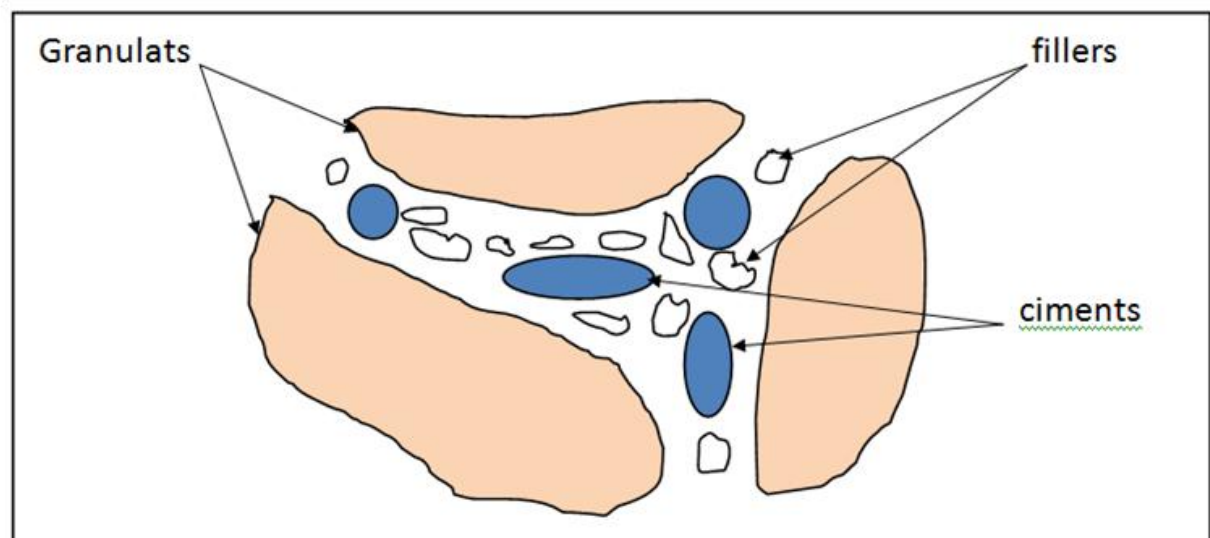


Figure 1.2: Illustration de l'effet filler dans les BAP

Les critères définissant les fillers selon La réglementation NF P18-508 couvre divers aspects, notamment les caractéristiques physiques et chimiques. (voir Tableau 1-2, Tableau 1-3).

Tableau 1.2 : Exigences relatives aux caractéristiques physiques du filler calcaire [7].

Propriétés	Passant a 63 $\mu$ m	SSB
Critères	> 63%	> 2000cm <sup>2</sup> /g

Tableau 1.3: Exigences relatives aux caractéristiques chimiques de filler calcaire [7].

Propriétés	Indice d'activité	Teneur CaCO <sub>3</sub> total	Valeur de Bleu	Teneur en Sulfate
Critères	> 0,68	> 62%	< 1,3 g/100g	< 0,15%

Selon Derabla R [8] la meilleure utilisation de filler calcaire dans les BAP est d'ordre inférieur à 20% de la masse de ciment (F/C < 20%).

## 1.4 Critères de composition du BAP

### 1.4.1 Un volume de pâte importante

Le béton autoplaçant se distingue par un volume de pâte élevé, constitué de ciment, d'addition, d'eau, d'adjuvant et d'air. Ces composants sont utilisés en quantités plus importantes par rapport au béton classique. Cette concentration élevée de pâte a pour effet de séparer les granulats présents dans le mélange, réduisant ainsi les frottements potentiels. Cette caractéristique confère au mélange une fluidité accrue, facilitant ainsi son versement dans les coffrages. Selon l'AFGC [12], ce volume doit se situer entre 330 et 400 litres par mètre cube.

### 1.4.2 Une teneur importante en fines ( $\varnothing < 80 \mu\text{m}$ )

Les BAP renferment une proportion de fines supérieure à celle du béton traditionnel (environ 500 kg/m<sup>3</sup>), afin de minimiser les risques de ségrégation et de ressuage. Le choix des ajouts minéraux (tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau ou le filler calcaire, qui est l'une des additions couramment utilisées dans les compositions de BAP) dépend des exigences de résistance à la compression, des critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206) et des paramètres de maniabilité, notamment la fluidité. L'incorporation de ces ajouts minéraux modifie la structure poreuse de la matrice cimentaire et impacte les propriétés mécaniques ainsi que la capacité autoplaçante du béton [6].

### 1.4.3 Utilisation de superplastifiants

Les superplastifiants sont employés dans les Bétons Autoplaçants (BAP) pour abaisser le volume d'eau nécessaire à l'état frais, augmentant également leur résistance mécanique une fois durcis. Ces adjuvants agissent en diminuant le taux E/C. Ils sont incorporés au mélange de béton frais à des proportions allant de 0,8 et 3 % du poids total de ciment employé [13].

Lorsqu'ils sont intégrés au mélange cimentaire, ces matériaux forment des chaînes atomiques chargées négativement. Ces chaînes se fixent aux particules de ciment et aux additifs, générant une répulsion électrostatique et stérique entre ces particules. Ce processus explique la fluidité et la maniabilité du béton obtenues malgré l'utilisation d'une faible quantité d'eau.

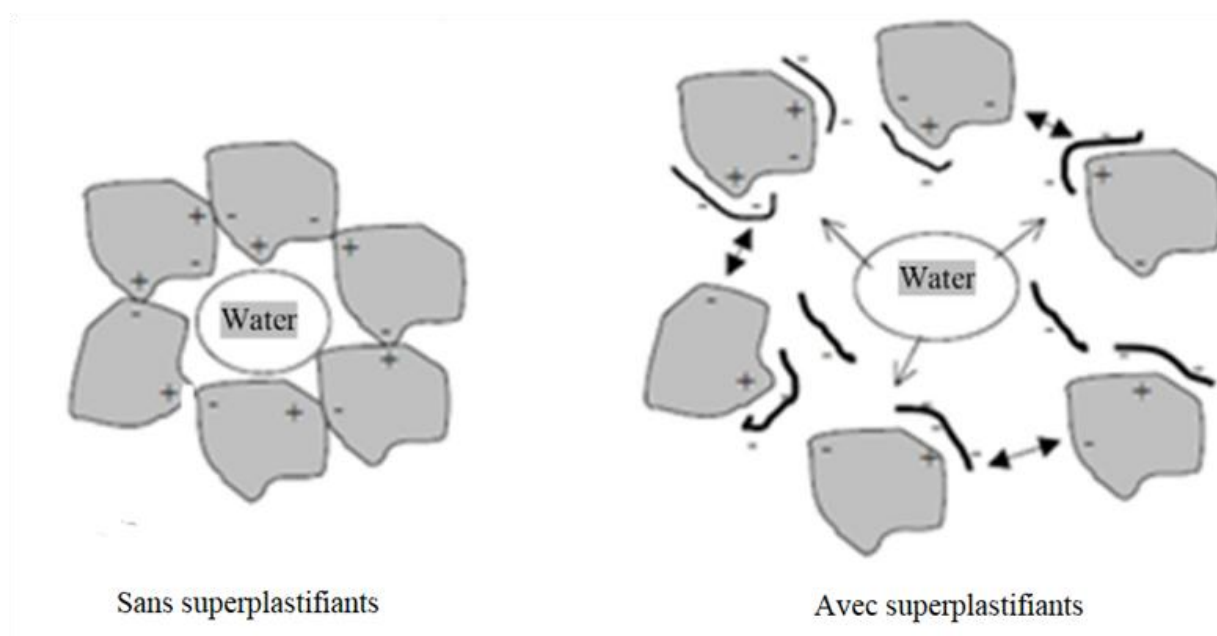


Figure 1.3: L'effet du Superplastifiant sur les particules de béton autoplaçant [3].

### 1.4.4 Emploi éventuel d'un agent de viscosité pour la rétention d'eau

Consiste en l'incorporation d'une substance hydrosoluble qui augmente la consistance de l'eau. Ces agents sont constitués de longues chaînes de polymères, dérivées de composés cellulaires, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Ces polymères se fixent au pourtour des molécules d'eau, absorbant ainsi une portion de cette eau. Les rôles secondaires de ces agents fluctuent largement selon le type d'agent de viscosité utilisé.

Ces produits sont particulièrement utiles dans le cas de bétons où le taux E/C est important afin de réguler la viscosité, notamment lorsque les fines ne sont pas naturellement capables d'absorber l'eau.

#### 1.4.5 Une quantité réduite de gravillon

Il est possible d'incorporer des granulats, qu'ils soient concassés ou roulés, ayant un diamètre ne dépassant pas 20 mm dans la formulation des Bétons Autoplaçants (BAP). Cependant, étant donné que les gravillons peuvent provoquer des blocages dans des zones confinées du béton, il est nécessaire de limiter leur volume. Paradoxalement, la présence de ces gravillons contribue à accroître la densité du squelette granulaire du béton, renforçant ainsi sa résistance mécanique. Ils contribuent également à diminuer le volume de liant requis pour atteindre les niveaux d'ouvrabilité et de résistance souhaités. En règle générale, ces observations conduisent à établir un ratio gravillon/sable d'environ 1 dans les bétons autoplaçants.

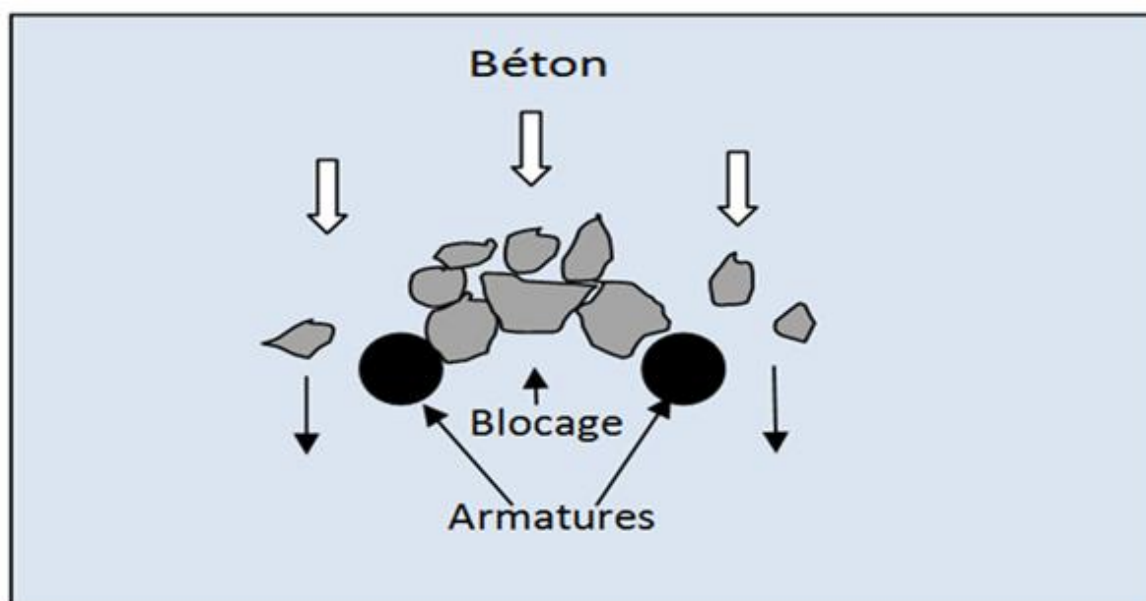


Figure 1.4: Phénomène de blocage des gros granulats en zones confinés [6].

#### 1.5 Les approches de formulation des Bétons Autoplaçants (BAP)

Les composants d'un Béton Autoplaçant (BAP) diffèrent de ceux d'un béton traditionnel en termes de nombre et de proportions. En plus des composants habituels du béton, des adjuvants sont ajoutés pour obtenir des propriétés rhéologiques et mécaniques spécifiques. En conséquence, la méthode Dreux-Gorisse ne peut pas être

appliquée pour sa formulation. Ainsi, des chercheurs de différentes régions du globe, que ce soit au Japon, en France, en Suède, ou ailleurs, ont cherché à développer diverses approches pour concevoir un béton autoplaçant (BAP). Les scientifiques se poursuivent dans le but de parvenir à une méthode unifiée et normalisée pour l'élaboration des BAP.

### **1.5.1 Méthode de formulation japonaise (l'amélioration des Mortiers)**

La méthode d'Okamura et Ouchi, mentionnée dans [14], privilégie l'augmentation du volume de la pâte au lieu de celui des granulats, ce qui entraîne une surdose de liant dans les BAP. Cette approche conduit à la production de bétons coûteux, mais cette dépense est compensée par les réductions réalisées sur la main-d'œuvre. Les particularités distinctives de cette approche se présentent comme suit:

- ❖ La quantité de granulats de grande taille est restreinte à la moitié de sa masse volumique pilonnée pour prévenir les blocages.
- ❖ La quantité de sable est déterminée à 40 % du volume global du mortier, assurant ainsi une fluidité grâce à la réduction des frictions granulaires.
- ❖ Bien que la dose de liant ne soit pas clairement définie, le règlement recommande une quantité minimale de  $350 \text{ kg/m}^3$ . Les ratios E/C (eau/ciment) ou E/L (eau/liant) capables d'être sélectionnés en fonction des résistances mécaniques prévues.
- ❖ Les quantités d'eau et de superplastifiant sont établies à partir d'expérimentations sur un mortier où le sable représente 40 % du volume total. Des tests d'affaissement sont effectués à l'aide d'un cône d'écoulement. Une corrélation linéaire a été notée entre l'affaissement et l'écoulement en modifiant la quantité d'eau tout en maintenant un dosage fixe de superplastifiant [15].

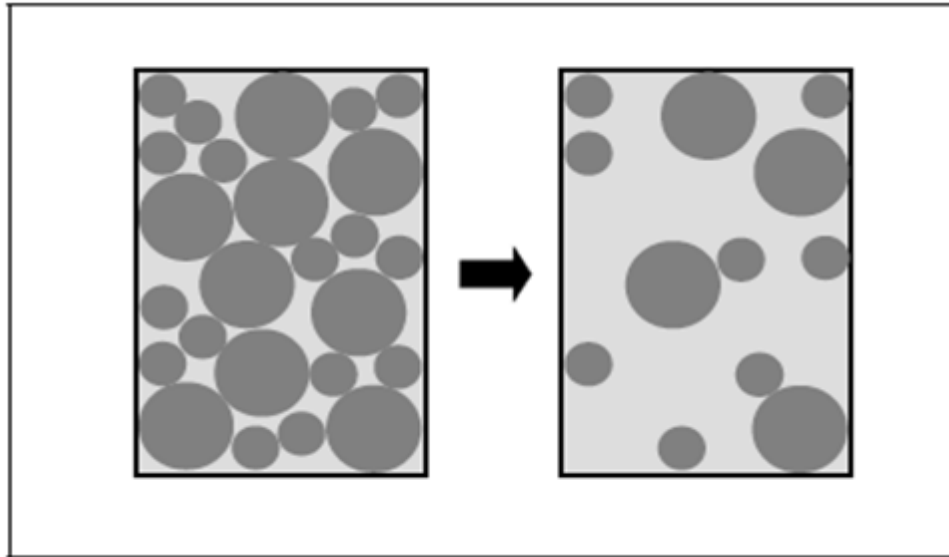


Figure 1.5: Diminution du volume de gravillon à 50 % de sa densité [16].

### 1.5.2 Approche Suédoise (minimisation de la quantité de pâte)

Les auteurs de cette **approche** (Petersson et al, [17] Tangtermsirikul S et al, [18]...) Ils voient le béton comme un mélange à deux phases : une phase liquide comprenant l'eau, le liant et les adjuvants, et une phase solide constituée des granulats. Dans le cas particulier d'un Béton Autoplaçant (BAP), la pâte assume deux fonctions principales:

- Fluidifier en réduisant la friction entre les granulats.
- Produire un effet de dispersion pour éloigner les grains et éviter la formation de voûtes, qui peuvent causer des obstructions derrière les armatures.

Les chercheurs avancent également qu'un volume minimal de pâte est requis pour exercer ces deux fonctions en même temps. Le rapport final entre granulats et sable est celui qui permet d'obtenir un volume identique de pâte est requis pour réaliser les caractéristiques escomptées.

Les matériaux fins, l'eau et le superplastifiant sont ensuite modifiés afin d'atteindre une viscosité adéquate, un seuil de cisaillement réduit et la résistance à la compression désirée.

Cette approche permet d'optimiser le squelette granulaire, bien que le critère de blocage ne soit pas universel pour tous les types de granulats.

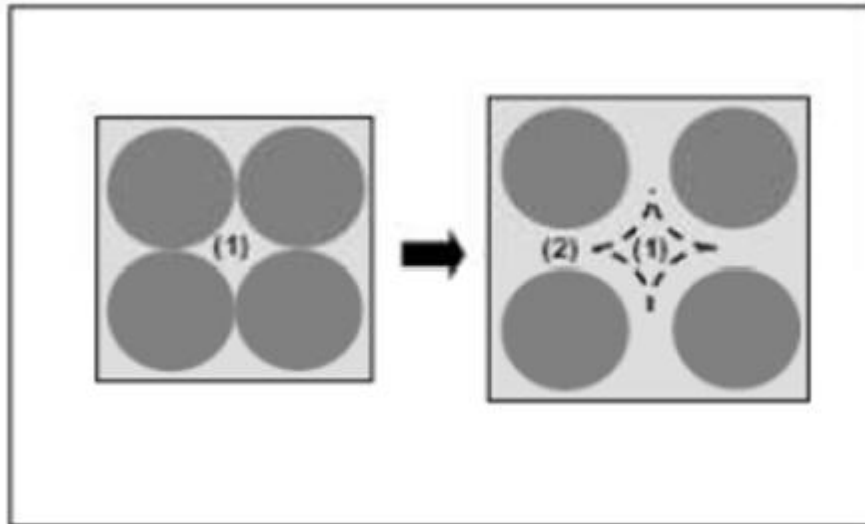


Figure 1.6: Concept d'excès de pâte : la pâte occupe les espaces vides (1) et éloigne les granulats (2) [6].

### 1.5.3 Approche française (amélioration de la structure granulaire)

La méthode formulée en France au sein du LCPC par De Larrard et Sedran [19] se focalise sur la conception des bétons en optimisant la porosité de l'ensemble, depuis le ciment jusqu'aux granulats. Selon les auteurs, la résistance à la compression est étroitement associée à la densité de la pâte. Par ailleurs, la fluidité du matériau est déterminée par la configuration de la structure granulaire.

Au LCPC, une approche mathématique a été développée en s'appuyant sur un modèle de suspension solide (via le logiciel RENE LCPC). Ce modèle repose sur les interactions entre les divers composants de la composition. Il offre la possibilité de prédire la densité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1 %, en tenant compte des éléments suivants:

- Les répartitions granulaires des constituants.
- Les ratios exacts du mélange.
- La densité intrinsèque du matériau.
- La densité apparente du béton.

Pour simplifier cette approche complexe, un logiciel tel que Bétonlab Pro 2 a été développé. Ce programme intègre tous ces éléments dans ses calculs, ce qui facilite la création de divers types de bétons : bétons de haute performance, bétons standards,

bétons à séchage rapide pour un démoulage immédiat, ainsi que des bétons autoplaçants.

## **1.6 Propriétés des bétons autoplaçants**

### **1.6.1 Caractéristiques à l'état frais**

Les caractéristiques générales d'un béton autoplaçant à l'état frais se concentrent sur deux aspects clés : la coulabilité et la cohérence. Ces caractéristiques sont évaluées selon trois critères mesurables à l'aide de tests empiriques [3]:

- 1- Capacité de remplissage des coffrages : évalue la capacité du béton à se répandre et à remplir efficacement les espaces dans les moules ou coffrages, sans besoin de vibration.
- 2- Capacité de circulation dans les zones confinées : mesure l'aptitude du béton à se déplacer librement même dans les zones difficiles d'accès ou étroitement confinées, sans perdre ses propriétés.
- 3- Résistance à la séparation (statique et dynamique) : évalue la capacité de l'assemblage à maintenir son homogénéité et à éviter la séparation des constituants solides et liquides, aussi bien quand il est au repos que lorsqu'il est soumis à des mouvements ou des contraintes.

#### **1.6.1.1 Essais sur les BAP à l'état frais**

- **Test d'étalement (Slump Flow) :**

L'essai le plus courant pour évaluer les Bétons Autoplaçants (BAP) est l'essai d'étalement, couramment employé pour évaluer la mobilité dans un espace ouvert, c'est-à-dire la capacité du béton à remplir les formes. Cet essai se réalise à l'aide d'un cône métallique appelé "cône d'Abrams", fabriqué en acier galvanisé. Il possède des dimensions précises : un diamètre de 20 cm à la base, 10 cm au sommet, et une hauteur totale de 30 cm. Ce cône porte le nom de son inventeur, Duff Abrams.

L'essai d'étalement s'effectue comme suit:

- Le cône d'Abrams est placé à l'envers sur une plaque en acier, qui doit être solide et non absorbante.
- On remplit le cône avec du béton frais.
- La surface supérieure du cône est nivelée à l'aide d'une tige.

- Ensuite, le cône est soulevé avec précaution et verticalement d'environ 4 cm, en le tournant légèrement pour le démouler.
- Le béton fluide s'affaisse et s'étale, formant ainsi une galette sur la surface de travail.

On procède ensuite à la mesure du diamètre maximal ainsi que du diamètre perpendiculaire.

L'étalement final est calculé en prenant la moyenne de ces deux diamètres, qui ne doivent pas varier de plus de 5 cm (Figure 1.7) : l'étalement =  $\frac{D_1+D_2}{2}$

Effectivement, lors de cet essai, Il est aussi envisageable d'évaluer le temps nécessaire au béton pour s'étendre jusqu'à un diamètre de 50 cm, souvent désigné par la notation "T50". Cette mesure du temps peut fournir des informations supplémentaires sur la fluidité et aptitude à s'écouler du béton, complétant ainsi l'évaluation de sa mobilité [13].

La norme NF EN 206 [20] divise l'étalement du béton en trois catégories. :

Tableau 1.4: Les classes d'étalement de béton [20].

Classe	Étalement en (cm)
SF1	de 55 à 65
SF2	de 66 à 75
SF3	de 76 à 85

En ce qui concerne les Bétons Autoplaçants (BAP), les valeurs d'étalement visées se situent habituellement dans une plage allant de 60 à 75 cm. Il est essentiel de noter que ces valeurs doivent être atteintes sans la présence d'une bordure de laitance ou d'un regroupement de gros granulats au centre à l'issue de l'essai. Cela garantit une répartition uniforme du matériau sans ségrégation ni accumulation de constituants spécifiques.

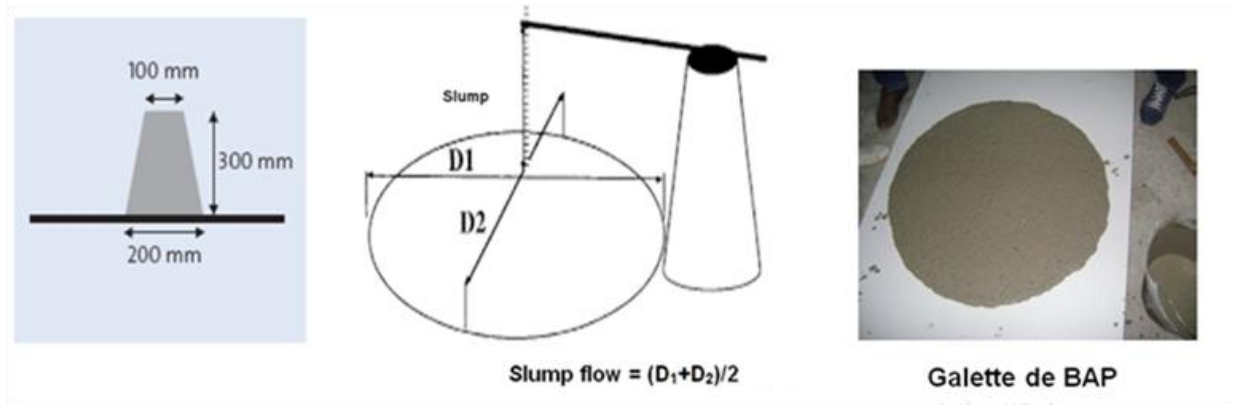


Figure 1.7: Essai d'étalement au cône (slump flow) [21]

- **Test d'entonnoir (V-shaped funnel) :**

L'essai à l'entonnoir en V, comme il est illustré dans la figure 1.8, vise à évaluer la mobilité du béton dans un environnement confiné, permettant ainsi d'évaluer sa capacité de passage. Cet essai reproduit un écoulement similaire à celui imposé entre deux armatures parallèles. Les dimensions spécifiques de l'entonnoir sont définies conformément à la figure (1.8).

Le protocole consiste à remplir l'entonnoir jusqu'au sommet, laisser reposer pendant une minute, puis ouvrir le clapet de fermeture situé à sa base. Cela encourage l'écoulement du béton et permet de mesurer le temps nécessaire pour vider complètement l'entonnoir.

Habituellement, la durée d'écoulement sert à mesurer la viscosité du BAP. Un écoulement rapide du béton depuis l'entonnoir indique une faible viscosité ainsi qu'une grande fluidité. Cette évaluation est souvent utilisée pour juger de la facilité du béton à se déplacer dans des espaces restreints et de sa capacité de circulation ([22, 23]).

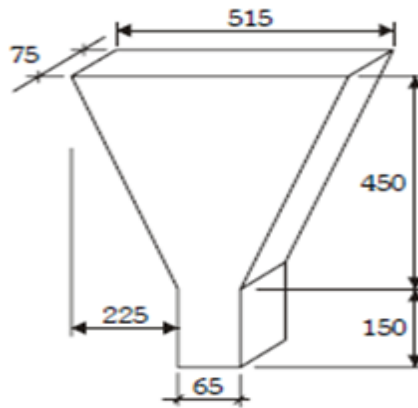


Figure 1.8 : V-Funnel dimensions en (mm) [24]

- **Test de la boîte en L (L-Box) :**

Cet essai particulier a pour objectif de mesurer la capacité du béton à se déplacer dans un espace restreint, afin de détecter tout risque de ségrégation dynamique et de garantir que la mise en œuvre du béton ne sera pas gênée par des blocages au niveau des armatures. La procédure est détaillée dans la norme NF EN 12350-10 [25]:

Les dimensions de la boîte sont définies selon la figure (1.9). Le test consiste à remplir entièrement la section verticale de la boîte avec du béton. Ensuite, on laisse le béton reposer pendant une minute avant de soulever la trappe, permettant au béton de s'écouler à travers les armatures vers la section horizontale. Les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  sont alors mesurées, et le rapport de remplissage est calculé en utilisant la formule  $H_2/H_1$ .

Selon la norme NF EN 206 [20], pour un Béton Autoplaçant (BAP), Le taux de remplissage doit dépasser 0,8. Si le béton peine à passer à travers les armatures ou si des blocages de granulats surviennent, cela peut signaler le début d'une ségrégation. Dans le cas des BAP, un taux de remplissage inférieur à 0,8 peut être un indicateur de ces problèmes de ségrégation à venir.

$$\frac{H_2}{H_1} \geq 0.8$$

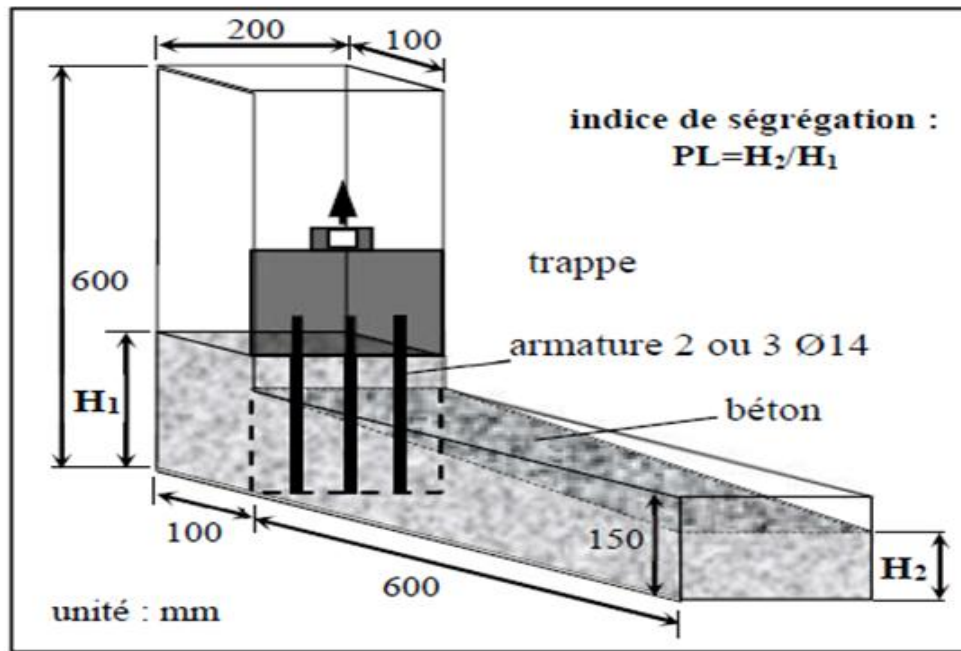


Figure 1.9 : Essai de la boîte en L (L-box test) [26]

- **Essai d'étalement avec anneau J (test J-Ring):**

Cet essai vise à évaluer la capacité d'un BAP à se déplacer à travers les éléments de ferrailage dans un coffrage. Il implique la réalisation d'un test d'étalement effectué avec un anneau constitué de 16 barres d'armature de 16 mm de diamètre, espacées d'environ 59 mm (centre à centre).

L'écart entre le diamètre d'étalement du Béton Autoplaçant (BAP) sans l'anneau, désigné comme J-Ring, et celui mesuré avec l'anneau est crucial pour évaluer cette capacité.

Lorsque cette différence est inférieure à 25 mm, cela indique que le BAP a une capacité adéquate à s'écouler à travers les armatures dans le coffrage.

Cependant, si cette différence excède à 50 mm, cela suggère que le béton a une capacité de passage médiocre. Cette technique d'analyse permet de mesurer la capacité du BAP à s'écouler efficacement autour des armatures dans le coffrage [27].

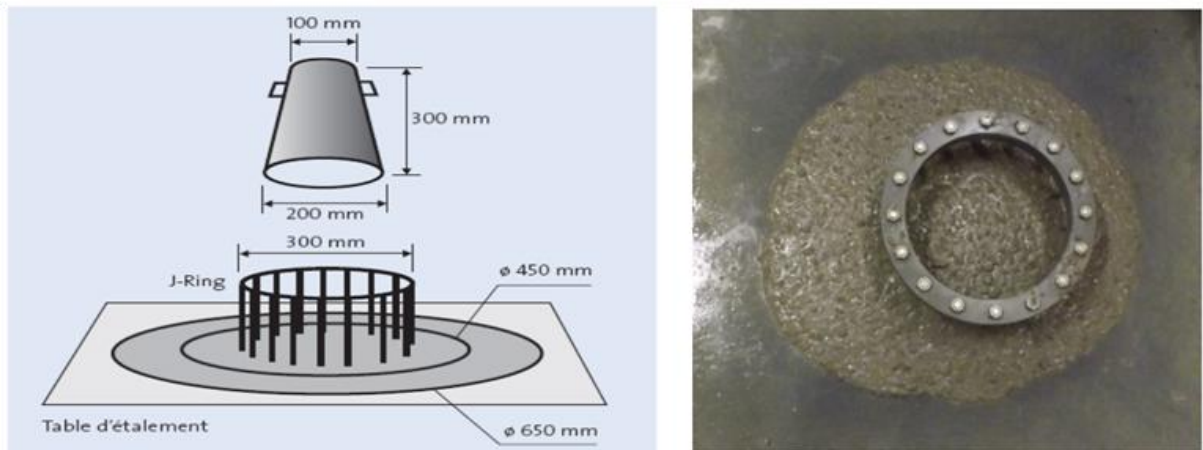


Figure 1.10 : Test du J-Ring [27]

- **Essai de la stabilité au tamis :**

L'essai de stabilité au tamis est une technique utilisée pour mesurer la capacité d'un béton autoplaçant à résister à la ségrégation statique lorsqu'il est encore frais. Ce phénomène de ségrégation survient lorsque les granulats de plus grande taille ou de plus forte densité ont tendance à se déposer au fond, tandis que les éléments plus petits ou plus légers remontent à la surface pendant la période de prise du béton frais [13].

La norme NF EN 12350-11 [28] précise les étapes à suivre pour réaliser cet essai, qui consiste à utiliser un seau et un tamis dont les mailles mesurent 5 mm. Les principales étapes de la procédure sont les suivantes:

- Verser 10 litres de béton dans un seau.
- Laisser le béton reposer pendant 15 minutes.
- Transférer la portion supérieure (4,8 kg de béton  $\pm$  0,2 kg) sur le tamis en le versant d'une hauteur de 50 cm.
- Attendre 2 minutes, puis mesurer la masse de la laitance ayant traversé le tamis.
- Déterminer le pourcentage de laitance en faisant le rapport entre la masse de la laitance et la masse initiale du béton.

Le pourcentage de la laitance ( $\Pi$ ) :

$$\Pi(\%) = \frac{\text{la masse de laitance}}{\text{la masse de L'échantillon}} 100 \quad (1.1)$$

Les normes d'acceptation pour une composition de béton autoplaçant (BAP) sont organisées en trois catégories:

- ❖  $0\% < \Pi < 15\%$  stabilité adéquate.
- ❖  $15\% < \Pi < 30\%$  stabilité problématique (essai de ségrégation à effectuer sur place).
- ❖  $\Pi > 30\%$  stabilité très insatisfaisante.

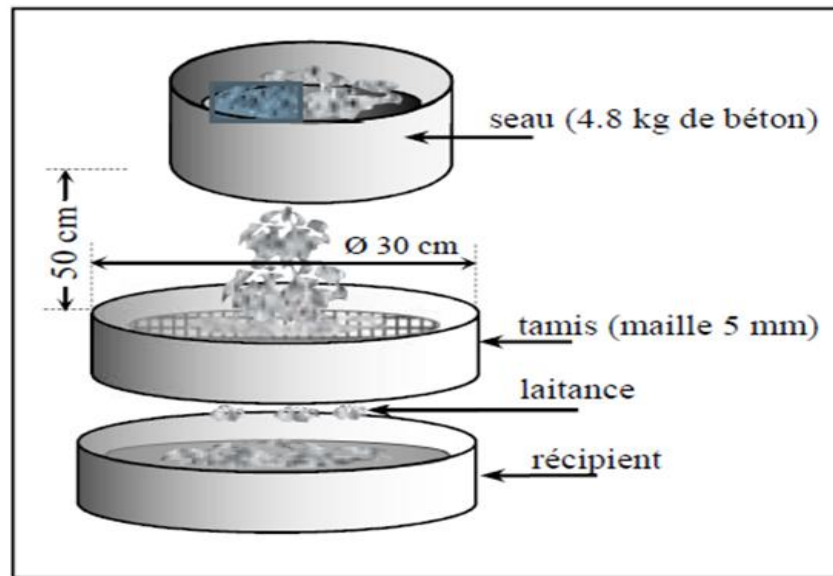


Figure 1.11: Test de la stabilité au tamis [26].

- **Essai a la boîte en U (U-BOX test):**

Pour réaliser cet essai, on commence par remplir la partie supérieure de la boîte avec du béton, puis on ouvre la trappe pour laisser le béton s'écouler à travers des barres de 13 mm de diamètre vers la seconde section en forme de U de la boîte (comme montré dans la figure 1.12).

Cet essai vise à évaluer l'aptitude du béton à se déplacer dans une zone confinée, garantissant ainsi que son coulage ne sera pas entravé par d'éventuels blocages des gros granulats [2]. En général, un Béton Autoplaçant (BAP) a une altitude de chargement égale ou supérieure à 30 cm, comme il est mentionné par Jin [30].

Donc pour les BAP :  $H_U \geq 30 \text{ cm}$  (1.2)

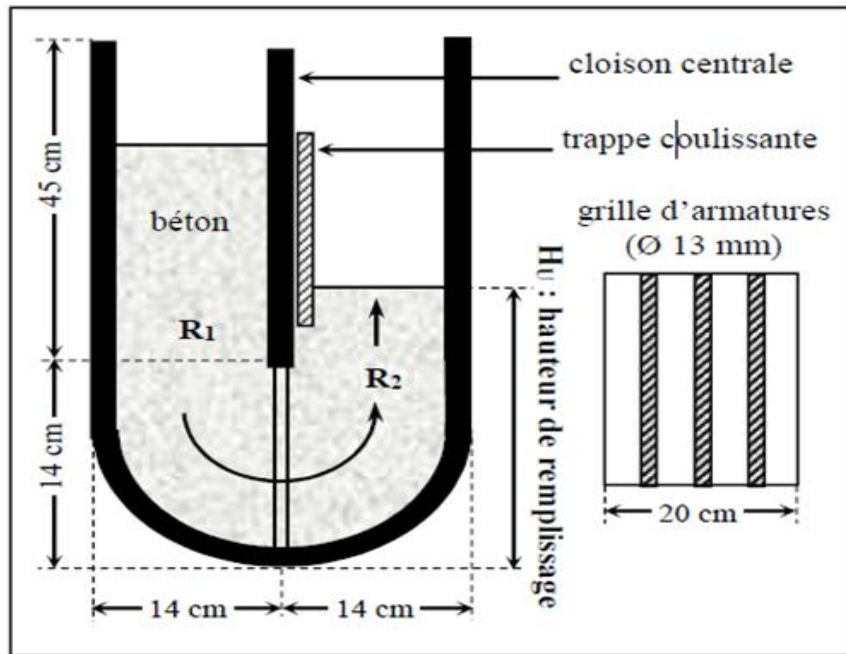


Figure 1.12: Essai a la boîte en U (U-BOX test) [26].

- **Essai rhéologique (Rhéomètre) :**

Les essais standardisés et recommandés pour examiner la maniabilité et la stabilité des Bétons Autoplaçants (BAP) sont essentiels. En complément, des évaluations des caractéristiques rhéologiques ont été effectuées à l'aide d'un rhéomètre à géométrie Vane.

Ce type d'appareil est spécifiquement conçu pour évaluer les propriétés rhéologiques des fluides. Il permet d'obtenir une caractérisation plus détaillée des paramètres tels que la viscosité, la plasticité (point de fluidification) et l'élasticité du matériau étudié.



Figure 1.13: Appareil rhéomètre.

Dans le tableau suivant, nous résumons les tests spécifiques effectués sur le béton autoplaçant (BAP) à l'état frais, en mettant en évidence leur utilité respective pour évaluer ses propriétés:

Tableau 1.5: utilité des différents essais [7]

Méthode	Remplissage	Viscosité	Passage	Ségrégation
Étalement	Étalement	T <sub>50</sub>		
V-funnel		Temps		
J-ring			Étalement	
Boîte en L			Rapport H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	
Stabilité				% de laitance
Rhéologie	Seuil	Viscosité		

### 1.6.2 Propriétés à l'état durci

Les bétons autoplaçants se différencient principalement des bétons traditionnels vibrés par leurs propriétés à l'état frais. En revanche, une fois durcis, leurs propriétés sont souvent similaires et varient en fonction de la composition spécifique utilisée.

- **Résistance à la compression :**

Concernant la résistance en compression après 28 jours, les BAP peuvent offrir une large gamme de performances, souvent entre 30 et 60 MPa, sans rencontrer de problèmes majeurs. Obtenir des résistances plus faibles est complexe à cause de a grande quantité de particules fines dans le mélange et des limitations liées au dosage en eau pour éviter la ségrégation.

Les particules fines du filler, correctement dispersées grâce aux superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, essentiellement par des moyens physiques, ce qui entraîne une matrice cimentaire plus compacte. Ces effets influencent considérablement la résistance mécanique jusqu'à 28 jours, mais tendent à s'atténuer par la suite.

D'après Assié S [21] et Gibbs J et al. [29], les bétons autoplaçants montrent généralement une résistance mécanique supérieure à celle d'un béton ordinaire ayant un taux E/C comparable.

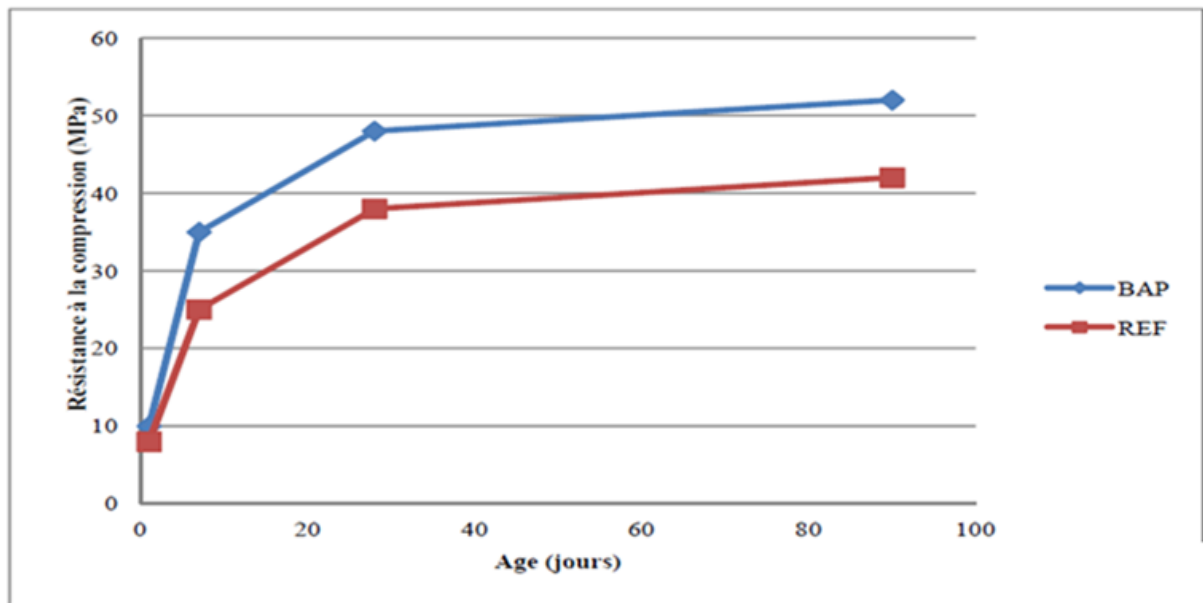


Figure 1.14: Evolution de la résistance mécanique d'un béton autoplaçant (BAP) et d'un béton traditionnel (REF) [30]

- **Résistance à la traction**

La formulation particulière des bétons autoplaçants (BAP) peut souvent entraîner de légères variations dans les rapports entre la résistance à la traction et celle à la compression par rapport aux bétons ordinaires (BO). Toutefois, selon Turcry [16], pour une résistance à la compression équivalente, le BAP et le BO présentent des valeurs similaires en ce qui concerne la résistance à la traction. Desnerck et al. [31], après avoir examiné 738 résultats issus de 77 études, affirment que les résultats des mélanges contenant entre 5 % et 95 % de BAP tendent à se conformer aux relations moyennes définies par l'Eurocode 2 et le modèle CEB-FIP 2010 pour les trois types d'essais de traction (directe, fendage et flexion). Cette correspondance est particulièrement notable lorsque le BAP est élaboré à partir de granulats calcaires concassés [26].

## 1.7 Conclusion

En guise de conclusion, on a noté que le béton autoplaçant se différencie considérablement du béton traditionnel, car il se distingue par une excellente maniabilité, grande mobilité, et il a aussi une résistance élevée à la compression, ainsi il contient de nouveaux composants influencent positivement sur son efficacité et sa durabilité.

Depuis son apparition dans les différentes parties du monde, de nombreuses recherches sont effectuées afin de trouver la meilleure formulation du béton autoplaçant qui répond aux caractéristiques nécessaires dont elle facilite le processus de coulage du béton et soit plus durable après sa durcissement que son homologue traditionnel.

Dans cette opération les chercheurs ont pris appui sur de nouveaux composants incorporés dans le béton traditionnel, notamment les adjuvants minéraux (filler calcaire, Laitier, pouzzolane, etc.). Et les additions chimiques (superplastifiants, agents de viscosité ...) où ils ont constaté que la modification des proportions la composition variée du béton influence les caractéristiques physiques et mécaniques. En outre ils ont pu obtenir de bons résultats qui leur ont permis d'utiliser ce type dans la construction de grandes installations géantes avec une efficacité et une vitesse étonnantes, dans différentes régions du monde. D'une autre part les recherches sont toujours en cours sur ce type afin d'arriver à la formulation la plus prépondérante dont elle comprend de nouveaux composants disponibles et moins chers.

# Chapitre 2: Durabilité du béton autoplaçant

---

## 2.1 Introduction

La durabilité du béton autoplaçant (BAP) est cruciale pour garantir la résistance et la longévité des ouvrages construites. Elle fait référence à l'aptitude du matériau à préserver ses propriétés et sa performance face à des conditions environnementales variées, ainsi qu'à diverses formes de détérioration. Les caractéristiques de durabilité d'une structure en BAP sont étroitement liées à plusieurs facteurs, notamment la perméabilité du matériau, qui joue un rôle critique dans sa résistance à l'infiltration de l'eau et d'autres agents nuisibles. Les conditions environnementales, telles que la soumission aux alternances de gel et de dégel, à la chaleur extrême, aux produits chimiques ou à la corrosion, ont une influence significative sur la longévité du béton autoplaçant. De plus, les propriétés de porosité et d'agressivité des milieux environnants influencent directement la capacité du BAP à résister à ces facteurs dégradants et à maintenir son intégrité structurale sur le long terme.

## 2.2 Définition de durabilité

La durabilité de l'ouvrage en béton repose sur sa capacité à maintenir sa résistance et à assurer ses fonctions structurelles pendant toute sa durée de vie prévue. Cette caractéristique est étroitement liée à l'aptitude du BAP à résister à l'infiltration des substances agressives.

La longévité du béton dépend largement des mécanismes de transport qui facilitent ou entravent la pénétration des agents extérieurs. Ces phénomènes incluent la pénétration, l'absorption et la diffusion des substances agressives à travers les pores du matériau. Plus le béton offre une résistance efficace à ces processus de transport, moins il est vulnérable aux dégradations provoquées par des facteurs environnementaux comme la corrosion, l'exposition à des produits chimiques ou les alternances de gel et de dégel [32].

**Pénétration :** la perméabilité du béton est essentielle pour évaluer sa durabilité. Elle représente l'aptitude du matériau à résister à l'infiltration de liquides ou de gaz sous l'influence d'un gradient de pression. La perméabilité de la surface du béton, notamment sa peau externe, est primordiale, car elle constitue le point de départ du processus d'infiltration. Plus cette surface résiste à l'infiltration des fluides et des gaz,

plus la durabilité du béton est renforcée, plus son aptitude à limiter cette infiltration influence sa résistance aux agressions externes, préservant ainsi sa qualité structurelle sur le long terme.

**Diffusion :** La diffusion implique la répartition uniforme de particules, d'atomes ou de granules à travers un espace, qu'il s'agisse de vides (pores), d'une zone disponible ou à travers un diaphragme. Ce processus se produit par le mouvement de molécules ou d'atomes depuis une zone où leur concentration est plus forte vers une région où elle est plus modeste, suivant un gradient de concentration, jusqu'à ce que les concentrations dans les deux régions se stabilisent.

Dans le contexte du béton, ce phénomène se manifeste lorsque le fluide se déplace dans le matériau, passant d'une zone où sa concentration est plus importante à une zone où elle est plus basse à l'extérieur du matériau.

**L'absorption :** L'absorption capillaire représente l'un des processus par lesquels les fluides pénètrent à l'intérieur des matériaux dotés de vides moléculaires, également appelés pores. Ce phénomène découle des différences de tension de surface à l'intérieur des capillaires. L'absorption d'eau par un béton sec est étroitement liée à sa porosité et à son niveau d'humidité initial.

La longévité du béton est étroitement associée à son aptitude à résister à l'infiltration de différents fluides au sein de sa structure, selon trois mécanismes d'écoulement possibles [32].

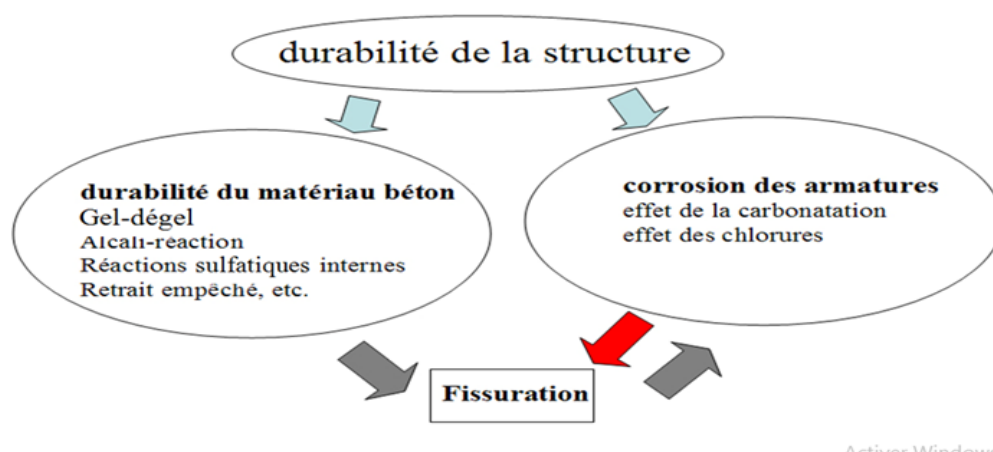


Figure 2.1 : Durabilité [33].

### 2.3. Facteurs influençant sur la durabilité

Le béton est une composition de plusieurs matériaux multiples et différents. Le mélange de ces matériaux entre eux peut entraîner des propriétés physiques différentes selon les matériaux mélangés, ce qui affecte le pourcentage des vides dans le béton et sa capacité à résister à l'intrusion d'agents nuisibles. Nous mentionnons certains de ces facteurs influençant sur la durabilité du béton:

#### 2.3.1 Porosité

La porosité dans un matériau solide représente la mesure des vides présents, lesquels peuvent être emplis par des fluides tels que liquides ou gaz. C'est une propriété physique énoncée numériquement entre 0 et 1 ou sous forme de pourcentage allant de 0 à 100%). Elle joue un rôle déterminant dans les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat, conformément à la Loi de Darcy. Elle est déterminée par le rapport entre le volume des pores et le volume total d'un matériau poreux.

$$p = \frac{v_{pores}}{v_{total}} \quad (2.1)$$

**P** : La porosité

**V<sub>pores</sub>** : volumes des vides

**V<sub>total</sub>** : Le volume global du matériau représente la somme du volume solide et du volume des vides.

Il ya trois type de porosité selon la taille [34]:

- **Microporosité** : concerne les pores dont le diamètre est plus petit ou équivalent à 2 nanomètres.
- **Mésoporosité** : correspond aux pores dont la taille varie entre 2 et 50 nanomètres.
- **Macroporosité** : elle concerne les pores ayant un taille dépasse 50 nanomètres.

La porosité du béton est affectée par plusieurs facteurs, notamment le rapport E/C, qui affecte sur la connectivité et la dimension des pores. Ces pores, allant de quelques nanomètres à des millimètres, peuvent être interconnectés et comble d'air ou d'eau libre, selon la teneur en eau non liée présente dans le béton autoplaçant. Cette eau libre n'est pas impliquée dans le processus d'hydratation du ciment. Réduire la porosité est crucial pour améliorer la résistance mécanique du béton. Outre les conditions de durcissement, le maintien d'une humidité élevée pendant le durcissement favorise une meilleure hydratation du ciment. Une durée de traitement

prolongée peut aussi réduire la dimension moyenne des vides [18]. L'organisme Euro-International du Béton [35] établit une catégorisation des différents types de pores présents dans la structure cimentaire du béton :

- **Porosité relative aux hydrates**, avec des pores d'un rayon moyen entre 20 et 30 Å, correspond aux plus petits vides, souvent appelés cavités du gel ou microcavités. Ces pores sont une propriété inhérente aux hydrates générés, notamment ceux du gel de C-S-H. Contrairement à d'autres types de porosité, cette catégorie de pores n'est pas influencée par les variations du rapport E/C. Toutefois, en termes de durabilité, cette porosité joue une fonction accessoire.

- **Porosité capillaires**, caractérisée par un rayon moyen variant de 0,01 à 100 µm, fait référence aux vides présents dans la matrice du ciment qui ne sont pas saturés par les hydrates. Initialement remplis d'eau, ces espaces constituent un réseau continu. Ces vides ont une importance majeure dans les mécanismes de transport des substances à l'intérieur de la matrice cimentaire du béton. À mesure que le ciment hydrate, ces espaces capillaires se remplissent progressivement, ce qui aide à diminuer la porosité capillaire. Le rapport E/C a une influence significative sur cette réduction.

- **Porosité dus à l'air occlus**, La porosité due à l'air occlus est générée lors du processus de malaxage et se présente sous la forme de bulles d'air sphériques, avec un diamètre moyen allant de 10 µm à plus de 1 mm. Sa dimension et sa répartition sont influencées par les conditions de préparation du béton, notamment le malaxage et le compactage, ainsi que par les propriétés rhéologiques du matériau et l'utilisation d'adjuvants. Contrairement à d'autres types de pores, ces vides d'air ne subissent pas de modifications pendant l'hydratation du béton. Leur présence peut engendrer des interruptions dans les pores capillaires de la matrice cimentaire, pouvant impacter le transfert de liquides ou de gaz au sein du béton.

Concernant les additions, la structure poreuse du béton autoplaçant est influencée par la nature et l'ampleur de leurs impacts physiques, microstructuraux, et éventuellement chimiques. Les matériaux de remplissage améliorent la répartition des dimensions des pores ainsi que les caractéristiques physiques du béton, telles que la maniabilité et la capacité de rétention d'eau.

Il a été observé par Boel et al [36] une répartition des dimensions des vides. distincte entre le Béton Autoplaçant (BAP) et le Béton Vibré (BV), avec une présence accrue de pores dans le Béton Vibré. Ces observations suggèrent l'existence d'une région moins compacte et plus perméable à l'intérieur de la microstructure des bétons vibrés..

La recherche RILEM [37] démontre l'impact des vibrations sur la microstructure du béton. Elle révèle une porosité accrue au niveau de la région de transition interfaciale (ITZ) dans les bétons ordinaire. Cette porosité supplémentaire résulterait de l'accumulation de fluide entre les interfaces. Il est à noter que cet effet néfaste ne concerne pas le Béton Autoplaçant (BAP), non soumis à de telles vibrations. Des études montrent des similitudes entre la structure poreuse du BAP et celle du Béton de Hautes Performances (BHP), avec une densité accrue pour le BAP par rapport au béton vibré. Cette densité plus élevée et la diminution des pores s'expliquent largement grâce à la présence matérielle de suppléments minéraux. En outre, le niveau d'hydratation et le rapport E/C, combinés avec la quantité d'eau, affectent de manière significative la structure poreuse. L'hydratation accroît progressivement le volume des produits générés, diminuant ainsi la taille des pores et leur interconnexion. Un rapport E/C réduit entraîne une porosité capillaire plus faible ainsi qu'une moindre interconnectivité. Globalement, l'ITZ du BAP semble se rapprocher davantage de la matrice cimentaire globale. Toutefois, un rapport E/C important amplifie l'étendue et la porosité de la zone de transition interfaciale (ITZ). Comparer les caractéristiques entre le béton autoplaçant (BAP) et le béton vibré est une tâche complexe en raison des différentes interprétations du concept de BAP à travers le monde. Il reste encore des analyses à réaliser pour mesurer certaines propriétés microstructurales, telles que la porosité du gel, la porosité capillaire et la porosité globale.

### 2.3.2 Le retrait

Le retrait est un phénomène physique inhérent à toutes les substances poreuses, qu'il s'agisse du bois d'un arbre ou de l'éponge dans votre évier de cuisine. Cela se produit lorsque l'eau s'échappe d'un matériau vers l'atmosphère par évaporation.

Tout comme l'éponge qui se rétracte sur le rebord de votre évier, la perte d'eau par un matériau entraîne une diminution de sa taille, Un processus désigné sous le terme de retrait. Pour une éponge, ce phénomène se traduit par une légère déformation et une variation de couleur. En ce qui concerne le béton, ces retraits peuvent entraîner l'apparition de fissures perceptibles. Ferrailage

Les variations dimensionnelles du béton, résultant de phénomènes physiques avant, pendant ou après sa prise, induisent le retrait. Si ces modifications ne sont pas maîtrisées à l'aide d'un ferrailage adéquat et de joints appropriés, ils peuvent entraîner la formation de craquelure. Il est essentiel de différencier les fissures provoquées par le retrait de celles issues de contraintes structurelles. En effet, ces dernières sont

régies par les normes de calcul propres au béton armé et ne doivent pas être confondues avec les fissures résultant des variations dimensionnelles du matériau.



Figure 2.2 : Fissuration de peau du béton [38].

### 2.3.3 Le fluage

Tout à fait, La réaction du béton face à une contrainte mécanique n'est pas immédiate et présente une composante différée. Ce phénomène est observable lors de la déformation sous une contrainte constante, un processus appelé fluage [39]. Ce comportement différé du béton durci occupe une place primordiale dans la fonctionnalité et la longévité des structures et des structures construits [40]. Les déformations constatées dans au sein des ouvrages en béton sous des charges permanentes peuvent largement dépasser les déformations immédiates au moment de l'application de la charge. Par conséquent, le fluage devient un élément essentiel à considérer sur le moyen et long terme [41].

Il semble exister des divergences dans les études menées sur le fluage des bétons autoplaçants en comparaison aux bétons ordinaire. Certains chercheurs, tels que Benkechache, Boukni et al. [42] et Bensebti, Houari et al. [43], ont signalé des valeurs de fluage plus importantes pour les bétons auto-plaçants comparativement aux bétons vibrés. En cependant, d'autres études, comme celles de Proust et Pons [44], De Schutter, Bartos et al. [45], Turcry, Rozière et al. [46], ont indiqué des déformations de fluage identiques entre les BV et les BAP ayant une résistance en compression similaire. Par ailleurs, des recherches effectuées par Assié [21], Leemann et Hoffmann [47], Heirman, Vandewalle et al. [48], Loser et Leemann [49], Leemann, Lura et al., ont également exploré ces phénomènes. [50] ont souligné une plus grande propension au fluage pour les BAP comparativement aux BV. Les

divergences peuvent provenir de plusieurs facteurs, notamment des formulations spécifiques de béton, des conditions d'implémentation, ou des approches de mesure employées dans les différentes études.

## 2.4 Les attaques chimiques des bétons

Les ouvrages en béton, en raison de leur porosité inhérente, peuvent subir des dommages en présence de conditions environnementales agressives. Les éléments extérieurs tels que le dioxyde de carbone, les sulfates ou les acides peuvent pénétrer les pores du béton, interagir avec les éléments chimiques de la pâte de ciment et créer de nouveaux matériaux par réaction chimique. Ces interactions peuvent affaiblir la surface du béton et provoquer des dommages tels que la corrosion ou la dégradation des structures, en particulier dans les ouvrages soumis à des environnements industriels, agricoles ou contenant des égouts, où les substances agressives sont souvent présentes. Ceci met en évidence l'importance de sélectionner des compositions de béton résistantes et adaptées aux conditions environnementales spécifiques pour garantir la durabilité et la résistance des ouvrages.

### 2.4.1 Actions des acides

Les acides sont généralement définis par leurs réactions avec des substances complémentaires appelées bases, selon la description de Johannes Bronsted et Thomas Lowry. Un acide est un composé chimique qui tend à céder un proton à sa base équivalente, provoquant ce que l'on désigne par des interactions acido-basiques. Le pH, quant à lui, évalue de façon logarithmique la concentration des ions hydrogène dans une solution. Il révèle le niveau d'acidité ou d'alcalinité d'un composé. Un pH inférieur à 7 signifie que la substance est acide, au-dessus de 7 elle est basique ou alcaline, et 7 représente la neutralité, tel que dans l'exemple de l'eau pur.

- **Sources des acides**

Les environnements acides sont souvent rencontrés dans différentes situations :

- Les eaux naturelles dans des environnements tels que les tourbières et les bogs, présentant un pH pouvant chuter vers 4 ;
- Les milieux industriels, que l'on retrouve au sein des secteurs chimiques et alimentaires;
- Les systèmes d'égouts, où l'action bactérienne génère de l'hydrogène sulfuré provenant de composés soufrés, s'alliant à l'humidité atmosphérique pour se condenser en tant qu'acide sulfate, pouvant altérer le béton ;

- Les précipitations acides, formées essentiellement d'acide sulfuré et d'acide nitreux, avec un degré d'acidité entre 4.0 et 4.5, susceptibles d'altérer la surface exposée du béton [1].

- **Processus d'agression**

L'interaction entre le béton et les acides est un processus complexe qui diminue les caractéristiques structurelles de la matière, comme sa résistance en compression. Le béton, similaire aux granulats calcaires, est basique avec un degré d'acidité supérieur à 12,5, le rendant fragile à l'attaque acide. Les acides réagissent avec les éléments calcaires présents dans le béton, formant des substances de calcium provenant de l'acide corrosif. Si l'acide continue à circuler, il éliminera continuellement ces dépôts de sel, prolongeant ainsi l'attaque. La mobilité du fluide acide est donc un élément crucial pour son agressivité.

Quant à l'acide sulfurique, il est généralement considéré comme relativement inoffensif pour le béton, puisque les sulfates de calcium présentent une faible solubilité dans l'eau. Cependant, les atomes sulfate peuvent avoir un impact néfaste sur le béton en provoquant un gonflement (effet de sulfate). [1]).



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique  $\longrightarrow$  sulfate de calcium + eau

Lorsque l'acide sulfurique entre en contact avec la chaux libre présente dans le béton, cela entraîne la création de gypse. Cette interaction est liée à une augmentation du volume du béton. Une réaction beaucoup plus destructrice implique l'aluminate de calcium et les cristaux de gypse formés. Ces deux substances réagissent pour produire de l'étringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ), qui est moins soluble dans l'eau.

En ce qui concerne l'acide chlorhydrique, il est jugé comme particulièrement nuisible, puisque le composé généré (chlorure de calcium) est très soluble dans l'eau. L'interaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite peut être illustrée par la formule suivante :



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique  $\longrightarrow$  chlorure de calcium + eau

Les acides inorganiques puissants n'agissent pas seulement sur l'hydroxyde de calcium, mais affectent également d'autres composants de la pâte de ciment durcie. Ils génèrent des sels à base de calcium, d'aluminium ou de fer, et produisent aussi des acides colloïdaux à base de silicium, comme les gels de silice, de plus ces interactions entraînent des transformations chimiques importantes [51].

D'après les études, le rythme auquel se produit l'agression acide est déterminé par plusieurs éléments:

- Les facteurs associés à la solution acide : la teneur, le niveau de pH, la fluidité, la nature de l'acide, ainsi que la capacité de dissolution du sel calcique produit.
- Les aspects concernant le béton ou le matériau cimentaire : la résistance du béton (méthode de durcissement, compactage, etc.), sa formulation (proportion eau/ciment, quantité de ciment, type de ciment, alcalinité du matériau, etc.), ainsi que sa perméabilité (influencée par la taille et la répartition des pores), etc.
- D'autres éléments, comme la température et les circonstances de contact (l'effet corrosif est souvent intensifié lorsque le béton subit des phases de submersion et de séchage).

- **Impact des additifs minéraux sur la durabilité des bétons auto-nivelants face aux agressions acides.**

Le béton autoplaçant se distingue par l'ajout d'une quantité significative d'additifs minéraux, contribuant ainsi à une porosité réduite. Cet aspect joue un rôle crucial dans sa résistance face à la pénétration des agents agressifs. En effet, une porosité moindre entrave la pénétration, tandis qu'une porosité plus élevée la facilite.

Un autre élément clé influençant la corrosion du béton est la présence de CaO dans le ciment. Il est donc généralement recommandé d'utiliser des ciments avec des proportions réduites de ce composant. En effet, le CaO est impliqué dans les mécanismes de lessivage et d'agression acide d'un côté. Cependant, il constitue également un composant essentiel de la portlandite, qui, lorsqu'elle se convertit en CSH (silicate hydraté de calcium), augmente La durabilité du béton face aux agressions acides est renforcée grâce à sa faible dissolution dans l'eau.

Les liants enrichis en additifs pouzzolaniques, comme les fumées de silice ou les cendres volantes, montrent une meilleure résistance\*\* au lessivage et aux agressions acides, comme indiqué dans la littérature [52]. Selon les travaux de Kostuch et al [53], la substitution de 10% de métakaolin a été associée à un renforcement de la durabilité face aux agressions acides. Ce phénomène est expliqué par deux paramètres induits par le remplacement du métakaolin dans la matrice de ciment:

- ❖ Le métakaolin diminue le coefficient de transfert, ce qui restreint la propagation de la solution acide.
- ❖ La réaction pouzzolanique convertit la portlandite en CSH, qui a un coefficient de solubilité plus faible, ce qui améliore la durabilité du béton face aux agressions acides.

Les recherches de Belaribi O [1] ont porté sur des échantillons de béton autoplaçant (BAP) comprenant diverses proportions de pouzzolane naturelle et des pourcentages de sédimentation de dragage (VASE) par rapport à des échantillons sans additifs. Ces échantillons ont été immergés dans une solution acide (HCL) pendant un laps de temps défini, puis la masse de chaque échantillon a été mesurée à différents intervalles. Les données recueillies ont été utilisées pour tracer des courbes graphiques résumant ces expériences. Les résultats obtenus ont probablement mis en évidence l'effet de la composition du béton sur sa résistance à l'attaque acide et ont peut-être révélé des tendances concernant la perte de masse en fonction du temps d'exposition à l'acide.

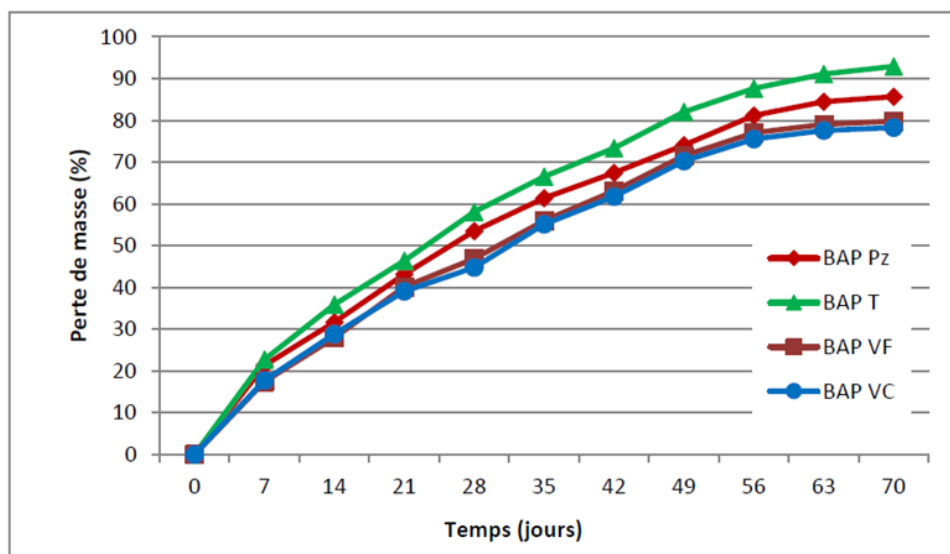


Figure 2. 3: La diminution de poids des BAP en fonction de la durée d'immersion dans une solution de 5 % d'HCl [1].

BAP PZ : béton autoplaçant à composante pouzzolanique.

BAP T : béton autoplaçant témoin.

BAP VF : béton autoplaçant composé de VASE de barrage Fergoug - Ouest Algérie.

BAP VC : béton autoplaçant composé de VASE de barrage Chorfa - Ouest Algérie.

Les observations indiquent que le béton immergé dans un mélange d'acide chlorhydrique perd plus de 60% de sa masse à cause de la réaction avec l'acide, ce qui dénote une corrosion significative. De plus, la variation des pourcentages de perte de masse entre les échantillons témoins sans additifs minéraux et ceux avec différents additifs met en évidence l'impact crucial de ces additifs sur la robustesse du béton aux environnements agressifs et sa durabilité.

#### **2.4.2 Actions des sulfates**

Les milieux géologiques saturés en eau et riches en sulfates peuvent impacter le béton lorsqu'il entre en contact avec cet environnement. Les sulfates sont capables de s'infiltrer et d'entrer en interaction avec les composants aluminés du béton, entraînant la formation d'ettringite, une phase connue pour ses propriétés expansives. Cette précipitation d'ettringite peut provoquer des fissures, voire une décohésion du matériau, altérant ainsi ses propriétés mécaniques et de transports initiaux. Ces types d'altérations sont communément appelés attaques externes.

Les sulfates présents dans le ciment utilisé pour le béton, soit déjà présents dans le clinker lui-même, soit intentionnellement ajoutés sous forme de gypse pour contrôler la prise du matériau, sont connus comme des sulfates internes. Normalement, ces sulfates ne présentent pas de danger. Cependant, des conditions spécifiques, telles qu'une élévation de température au-dessus de 70°C durant l'hydratation du ciment, sont capables de entraîner une dilatation à intermédiaire ou long terme, entraînant des fissures voire la dégradation complète du ciment. Ce phénomène, appelé DEF (Delayed Ettringite Formation - formation différée d'ettringite), est observé principalement dans les matériaux cimentaires traités à la vapeur. Il s'agit d'une forme d'attaque par les sulfates internes. Il existe trois catégories d'ettringite qui peuvent exister ensemble dans un même béton, se distinguant principalement par les conditions de leur création. La première, l'ettringite de génération initiale, ne génère pas d'expansion. Cependant, la deuxième, l'ettringite de développement ultérieur, peut

entraîner une dilatation. Enfin, la troisième catégorie est l'étringite résultant d'une augmentation de température supportée par le béton au fil de son évolution, qui peut également provoquer une expansion.

#### **a) l'étringite de formation primaire**

L'étringite primaire émerge de l'hydratation des ciments via la transformation chimique entre l'agent de contrôle de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) et les aluminates calciques. Ces structures cristallines à forme étirée, apparaissent avant la solidification du béton, se cristallisant dans les vides du matériau. Ils n'engendrent pas de gonflement car leur cristallisation survient préalablement à celui du béton. Leur impact est bénéfique, contribuant à l'adhésion de la pâte de ciment au stade initial, réduisant la perméabilité du matériau et simultanément renforçant sa résistance mécanique.

#### **B) l'étringite de formation secondaire**

L'étringite présente dans le béton durci se développe par le biais de la circulation de l'eau dans la structure (processus de dissolution et de recristallisation), provenant de sources extérieures (comme les sols ou les milieux marins) ou internes (en raison d'une concentration excessive de sulfates dans les composants du béton). Cette formation d'étringite peut causer des gonflements internes, entraînant des dommages aux ouvrages. Durant les phases de dissolution et de recristallisation, elle se dépose sous une forme allongée dans les pores, fissures ou aux interfaces entre la pâte et les granulats du béton. En général, elle ne possède pas de caractère expansif et se forme à partir de la solution interstitielle ou lors de l'infiltration d'eau dans les zones poreuses ou fissurées du matériau.

En revanche, l'apport externe ou interne de sulfates peut engendrer de des dilatations internes, essentiellement causées par les pressions de cristallisation. À la différence des types qui ne provoquent pas d'expansion, cette étringite atypique se forme dans une structure dense et comprimée.

#### **c) l'étringite de formation différée**

L'EFF (Formation différée d'étringite), plus communément appelée DEF, concerne spécifiquement les bétons ayant été exposés à une température élevée au début de leur durcissement, dépassant en général les 65-70 °C. C'est à partir de cette température que l'étringite de préformation ne peut plus se créer lors des interactions

d'hydratation du ciment, et peut même subir une décomposition. Ces circonstances de température sont susceptibles de se produire lors de procédés thermiques ou dans le cadre de situations en béton massifs. Les cristaux d'étringite peuvent apparaître par la suite, après être revenus à la température environnante et en présence d'humidité dans le béton durci. Cette élaboration différée génère des pressions de dilatation qui provoquent des manifestations d'expansion.

#### ➤ **Source des sulfates**

Les sulfates sont susceptibles d'avoir une source naturelle, biologique ou provenir de la contamination domestique et industrielle. Ils proviennent notamment de roches et de minéraux naturels, tels que le gypse ( $\text{CaSOB}_{4\text{B}} \cdot 2\text{HB}_{2\text{B}}\text{O}$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSOB}_{4\text{B}}$ ), ainsi que des sulfates de magnésium comme l'epsomite ( $\text{MgSOB}_{4\text{B}} \cdot 2\text{HB}_{2\text{B}}\text{O}$ ), formant les sources externes les plus courantes de sulfates dans la nature.

En interne, les origines de sulfates sont susceptibles d'être multiples, comme suit [1]:

- ❖ Pollution des granulats par du gypse..
- ❖ Utilisation de granulats contenant du gypse.
- ❖ Existence de sulfures dans plusieurs agrégats.

#### ➤ **Processus d'agression**

Lorsque les sulfates naturels se dissolvent dans l'eau, comme les eaux souterraines, ils peuvent pénétrer le béton, interagir avec ses hydrates et altérer sa structure. Cela crée un risque potentiel de modification de la composition chimique du béton, influençant donc ses caractéristiques et sa pérennité.

Concernant le sulfate de sodium, les interactions chimiques se manifestent de la manière suivante [54] :

- ❖ Élaboration de gypse secondaire:

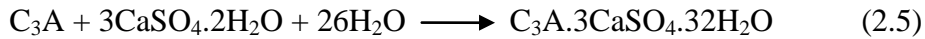


NaOH : Alcalinité élevée → stabilisation des CSH.

Lorsque le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se développe dans les vides internes de la pâte de ciment hydratée, il peut fonctionner comme un élément gonflant. Cependant, dans la plupart des cas, il n'entraîne pas ou peu d'expansion. Son impact principal réside dans la diminution de la solidité et de l'adhésion de la pâte de ciment. Cela se produit par la dissolution de la portlandite (CH) de même que par le gel et la déminéralisation du C-S-H, qui est chargé des caractéristiques adhésives de la pâte de ciment [55].

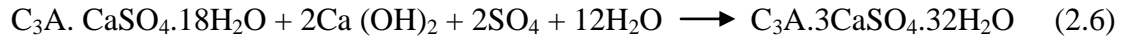
## ❖ Formation d'ettringite secondaire

1- Basé sur le C3A anhydre résiduel:

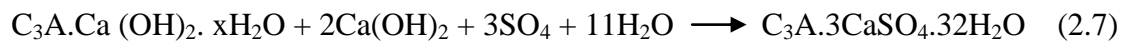


(Ettringite secondaire)

2- En partant des aluminates hydratés:



(Ettringite secondaire)



(Ettringite secondaire)

La formation de l'ettringite secondaire donne naissance à des cristaux extrêmement fins. Contrairement à l'ettringite primaire, cette variante n'est pas fibreuse mais plutôt de nature colloïdale. Ce type de cristal a un volume molaire beaucoup plus important, estimé à être entre 3 et 8 fois plus important que le volume du solide d'origine.

La figure 2.5 illustre le mécanisme théorisé par Santhanam et al. [56] pour l'attaque des sulfates de sodium. L'étape initiale (étape 1) décrit le processus initial. Dans des solutions de pH bas (entre 6 et 8), le déclenchement de l'expansion est accéléré. Cependant, une fois cette initiation effectuée (étape 2), le taux d'expansion ne diffère pas significativement même en cas de faible pH. Au deuxième stade, le gypse et l'ettringite débutent leur formation à la surface, provoquant la création d'une force de compression résultante en surface (étape trois). Cela engendre l'apparition de fissures à l'intérieur du mortier (étape quatre), associées à un dépôt de substances à la fois dans les fissures et à l'intérieur de la pâte. Le gypse se dépose de préférence dans les fissures et les espaces vides, car ceux-ci offrent les meilleurs sites de nucléation. Cette réaction donne lieu à trois zones distinctes dans le mortier : une surface altérée, une zone de dépôt des produits d'attaque, et une zone de fissures qui demeure chimiquement inchangée [1].

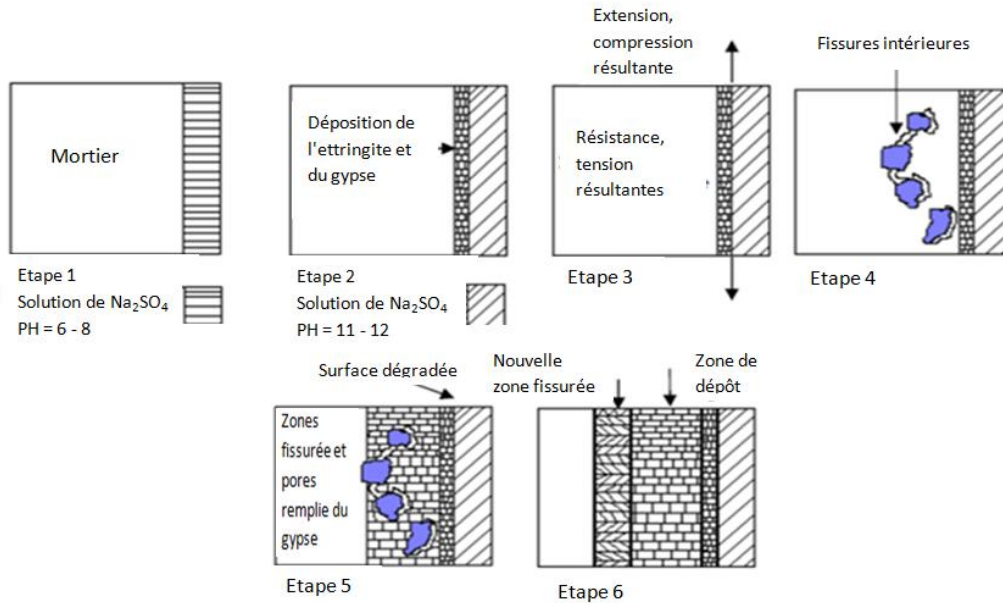
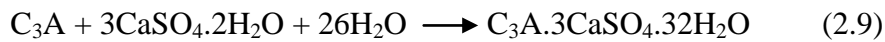


Figure 2.4 : Les processus suggérés pour l'agression des sulfates de sodium [56]

Il est captivant de remarquer que dans le cas du sulfate de magnésium, il se produit une réaction en deux étapes distinctes. En existence de magnésium, l'hydroxyde de calcium réagit pour produire de la brucite, du gypse et de l'ettringite:

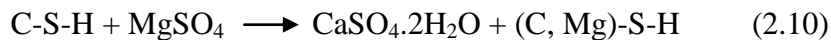


$\text{Mg}(\text{OH})_2$  : Brucite (faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



(Ettringite secondaire)

Substitution des ions  $\text{Ca}^{++}$  par les ions  $\text{Mg}^{++}$  dans les CSH :



(C, Mg)-S-H : gel faiblement cohésif.

Le schéma dans la Figure 2.6 propose un mécanisme pour l'attaque par les sulfates de magnésium. Une pellicule de brucite (hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) se développe promptement à la face du spécimen après l'interaction entre la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et le solution. Cette pellicule de brucite est souvent accompagnée d'une couche de gypse, entraînant une hausse du niveau de dilatation. Une fois que des conduits d'acheminement se créent à travers la surface de la pellicule de brucite, une

agression directe du CSH peut survenir. Cette agression mène à l'élaboration de MSH et de gypse secondaire (étape 4). La dégradation ultime du mortier est causée par la diminution de la résistance consécutive à la conversion de la pâte en MSH.

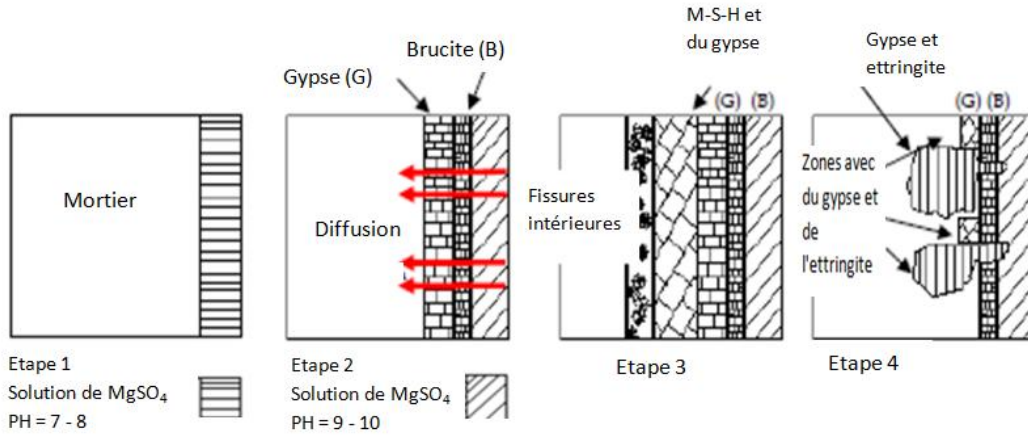


Figure 2.5 : Processus suggérés pour l'agression des sulfates de magnésium [57]

Les eaux souterraines ou l'eau de mer renferment souvent des concentrations élevées de sulfates de magnésium ( $MgSO_4$ ). Dans ce contexte, les deux ions, tant les ions positifs que les ions négatifs, participent à la réaction. Les ions  $SO_4^{2-}$  interagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour générer de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions  $Mg^{2+}$  peuvent combiner avec les ions  $OH^-$  pour produire de la brucite ( $Mg(OH)_2$ ) ou entraîner un échange partiel du calcium par du magnésium dans les CSH. Le silicate de magnésium hydraté (MSH) ainsi produit n'a pas de propriétés d'adhésion, et par conséquent, la pâte hydratée devient molle et désordonnée [58].

#### ➤ Impact des ajouts minéraux sur la résistance des bétons autoplaçants aux agressions sulfatiques

Une recherche menée par Said H [59] a examiné la résistance des bétons autoplaçants comportant divers additifs tels que la pouzzolane, le filler et les cendres volantes par rapport au béton ordinaire face aux attaques sulfatiques. Les résultats ont démontré l'impact du taux eau/ciment (E/C) sur la résistance du béton face à ces attaques : un rapport plus faible entraîne une moindre porosité et donc une plus grande résistance aux agents sulfatés. L'évaluation s'est faite en comparant les taux de diminution de masse des spécimens de béton plongés dans un mélange de sulfate de

sodium., mettant en lumière le rôle de ces additifs dans la protection contre l'agression des agents sulfatés.

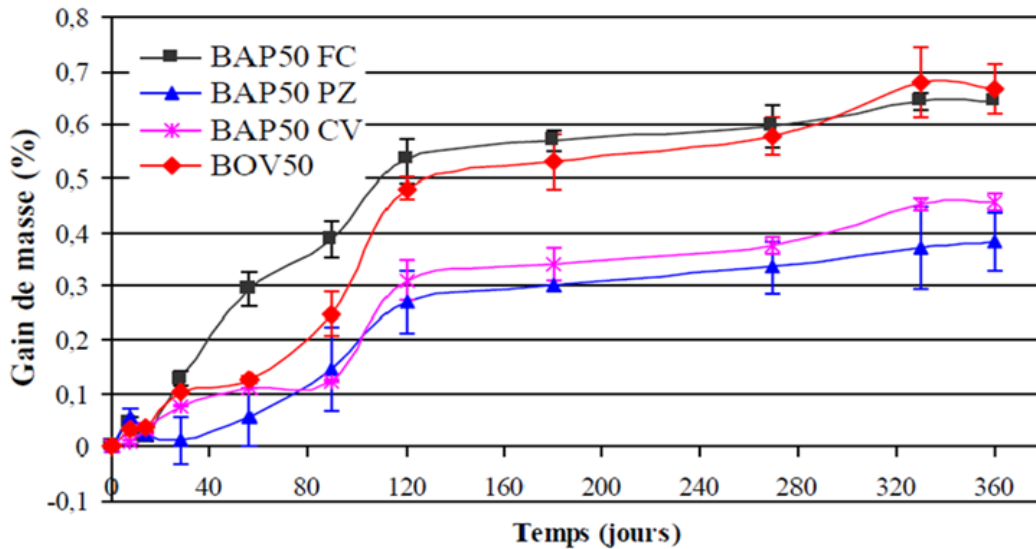


Figure 2.6: Changements du poids des spécimens plongés dans la solution de sulfate de sodium (béton d'une résistance de 50 MPa) [59].

Cette courbe démontre que l'incorporation de certains additifs tels que le filler, les cendres volantes et la pouzzolane dans le béton autoplaçant, lorsqu'il est immergé dans une mélange de sulfate de sodium, a nui à sa capacité de maintien de masse. Il est observé que le béton ordinaire a conservé une masse plus importante que le béton autoplaçant avec divers additifs après 320 jours.

Belaribi O [1] a réalisé une étude sur des échantillons de béton autoplaçant (BAP) contenant différentes proportions de pouzzolane naturelle et des pourcentages de sédimentation de dragage (VASE) par rapport à d'autres échantillons sans additifs. Il a immergé ces échantillons dans une mélange de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) pendant un certain temps, mesuré la masse de chaque échantillon à différentes périodes, et a élaboré une courbe graphique résumant ces expériences.

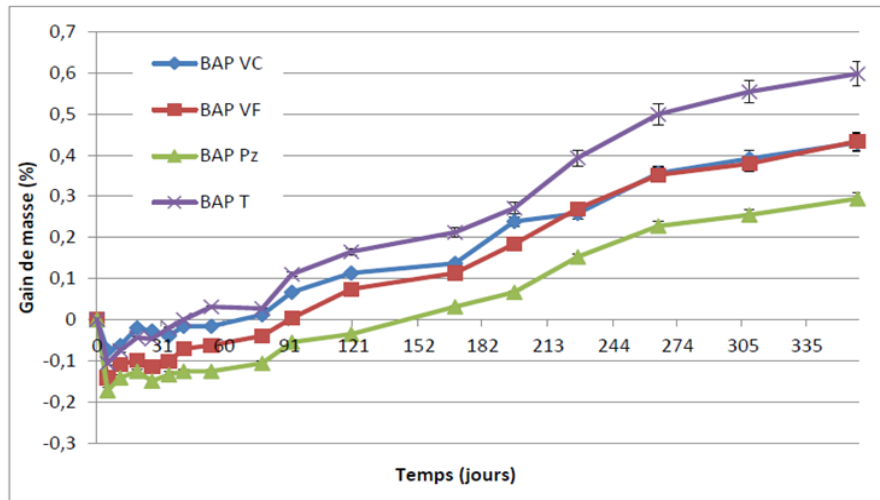


Figure 2.7: Changement de la masse des spécimens plongés dans le mélange de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) [1].

BAP PZ : béton autoplaçant formulé avec de pouzzolane.

BAP T : béton autoplaçant témoin.

BAP VF : béton autoplaçant formulé de VASE de barrage Fergoug - Ouest Algérie.

BAP VC : béton autoplaçant formulé de VASE de barrage Chorfa - Ouest Algérie.

Il a été constaté une diminution initiale de masse pour l'ensemble des spécimens de béton autoplaçant plongés dans la solution sulfate, en raison du processus de diffusion, cette diminution est ensuite suivie d'une hausse de poids.

Le graphique illustre également que l'ajout d'additifs (VASE et pouzzolane) dans le béton autoplaçant, lorsqu'il est plongé dans un mélange de sulfate de sodium, a impacté négativement sa capacité de rétention de masse. En comparaison, le BAP témoin a conservé une masse plus importante que le BAP avec les divers additifs.

Belaribi [1] a également évalué les résistances à la compression sur des échantillons de dimensions  $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$  plongés dans le mélange de sulfate de sodium. Les mesures ont été prises avant l'immersion et après 360 jours d'immersion. Le graphique ci-dessous présente la variation de la résistance à la compression en rapport avec la durée de submersion des divers bétons testés et maintenus dans le liquide de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

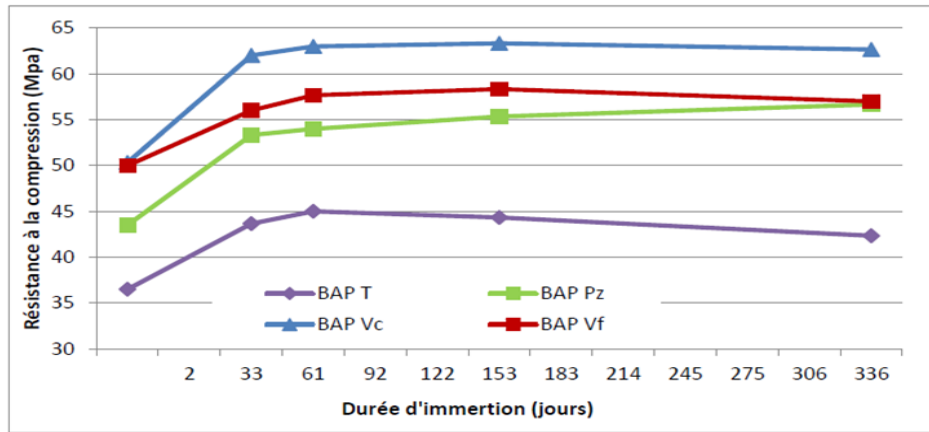


Figure 2.8: La résistance à la compression des BAP plongés dans un mélange à 5 % de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [1].

Le graphique met en évidence l'impact positif des additifs tels que le filler, les cendres volantes et la pouzzolane sur le développement de la résistance mécanique des éprouvettes de béton immergés dans une mélange de sulfate de sodium en fonction de leur âge. Cela met en lumière le rôle crucial des additifs dans l'amélioration de la résistance mécanique, même dans des environnements agressifs.

- Si le mélange de sulfate de sodium (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) est substitué par un mélange de sulfate de magnésium (MgSO<sub>4</sub>) avec le même principe que les expériences précédentes, les résultats suivants apparaissent dans les figures 2.11 et 2.12 :

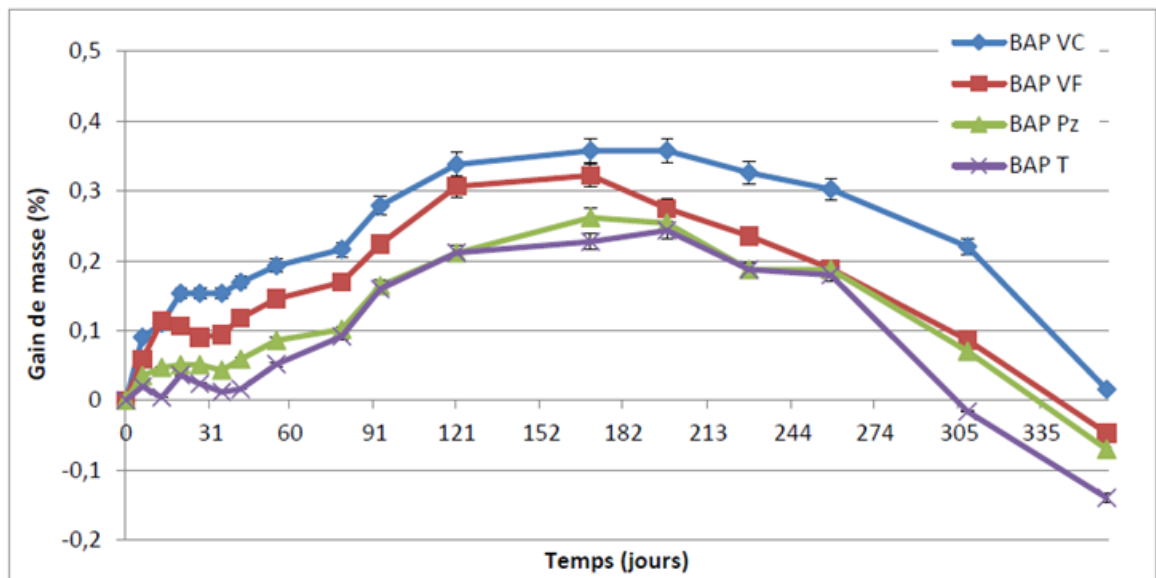


Figure 2.9: Variation du poids des BAP plongés dans le mélange à 5 % (MgSO<sub>4</sub>). [1].

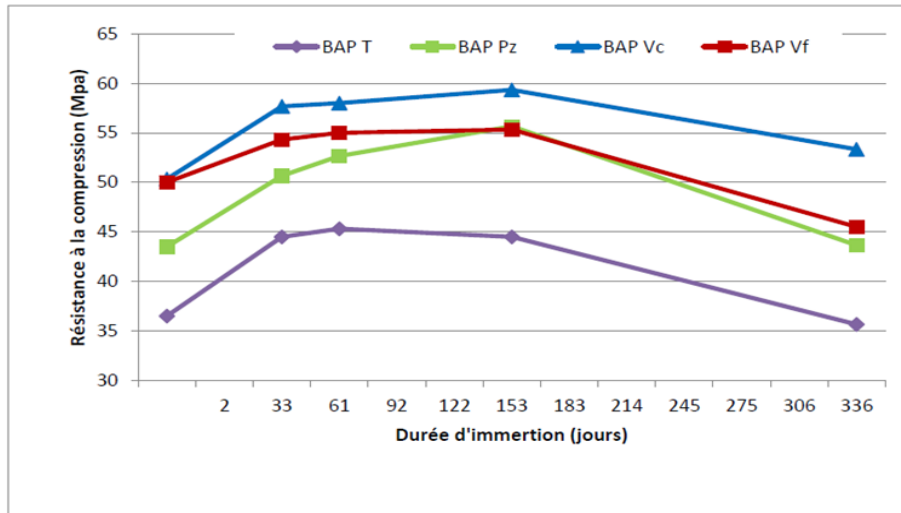


Figure 2.10: La résistance à la compression des BAP plongés dans la préparation à 5 % (MgSO<sub>4</sub>) [1].

Les graphiques indiquent que la solution de sulfate de magnésium a un impact plus négatif sur le BAP comparé à l'effet du sulfate de sodium lorsqu'il est immergé. Il est clair que le BAP avec des additifs minéraux maintient davantage sa masse par rapport à celui sans additifs lorsqu'il est exposé à une solution de sulfate de magnésium. Les additions minérales apportent une valeur supplémentaire au béton en préservant sa durabilité et sa résistance à la compression.

### 2.4.3 L'absorption de CO<sub>2</sub> (La carbonatation)

La carbonatation du béton est une démarche à travers laquelle le dioxyde de carbone de l'air (CO<sub>2</sub>) s'infiltré dans le matériau. Ce processus réduit l'alcalinité du béton, une caractéristique essentielle pour protéger les barres de renforcement contre la corrosion. La carbonatation devient plus prononcée dans les bétons définis par un taux élevé d'eau/ciment (E/C), une faible teneur en ciment, un durcissement rapide, une résistance initiale réduite et une porosité ou une perméabilité accrue de la pâte. Dans des conditions normales d'utilisation, la fumée de silice, le laitier granulé et les cendres volantes ont été associés à une augmentation minimale de la carbonatation, surtout lorsque le béton a mûri dans des conditions humides sur une courte période.

#### ➤ Les mécanismes de carbonatation

La carbonatation atmosphérique nécessite l'interaction du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) contenu dans l'atmosphère, qui s'infiltré à travers la structure perméable ou les cracks du béton et se solubilise, créant un acide au contact de la solution interstitielle.

Cette acidose entraîne la dissolution de la portlandite, qui constitue le stock d'alcalinité du béton. Lorsque le CO<sub>2</sub> interagit avec le liquide intragranulaire, il déclenche une transformation chimique avec les éléments hydratés de la pâte de ciment. Cette transformation modifie les éléments d'hydratation, comme la portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> et les CSH, en carbonates de calcium CaCO<sub>3</sub>.

La carbonatation provoque une diminution du pH dans le fluide interstitiel du béton, variant au départ d'environ 12,5 à 13,5 jusqu'à environ 9. Cette baisse de PH diminue la capacité protectrice de la solution envers les armatures métalliques, entraînant ainsi le début du processus de corrosion (voir Figure 2.13) [1].

D'un point de vue simplifié, le mécanisme chimique de la carbonatation du Ca(OH)<sub>2</sub> est susceptible d'être illustré par l'équation chimique ci-après:



Cette formule montre que la carbonatation de la portlandite s'associe en général à une évacuation de l'eau liée à la structure [71].

Il existe des indicateurs clés pour caractériser le développement du processus de carbonatation dans le béton, notamment la teneur en portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) et le indice d'acidité du fluide interstitiel. La figure 2.13 illustre l'interaction des trois états - gazeux, liquide et solide - au cours du processus de carbonatation de la portlandite. Ce phénomène atteint son maximum lorsque l'humidité relative se situe de 40 et 60 %, voire de 40 et 80 % [60], voire de 84 et 92 % [61]. Cette étendue équivaut en général à plusieurs strates de particules d'eau adsorbées sur la face du matériau rigide [62]. Il est essentiel de souligner que la carbonatation ne se produit ni dans un béton entièrement sec ni dans un béton totalement imbibé d'eau.

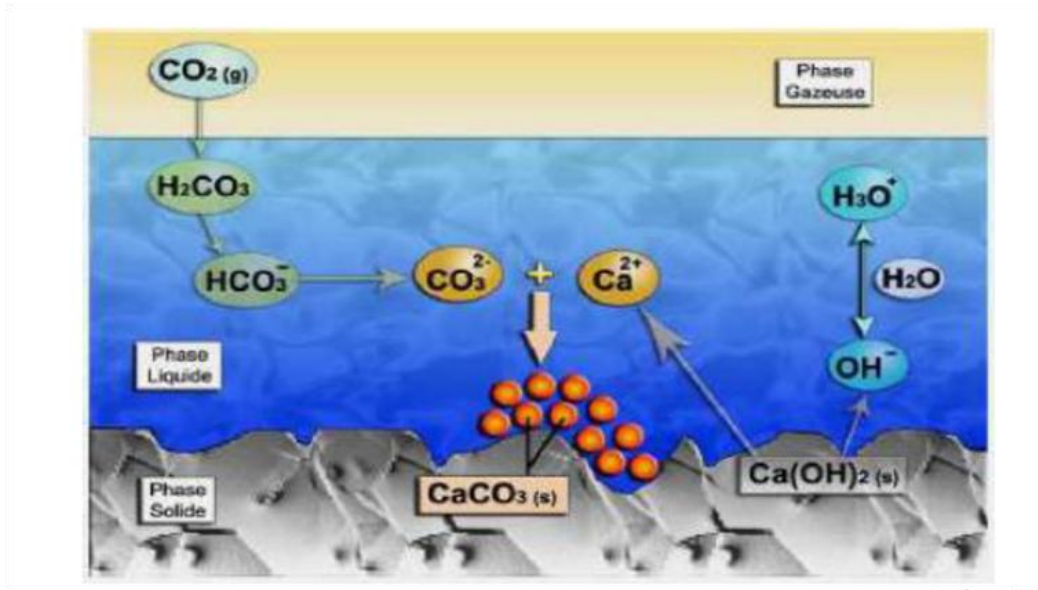


Figure 2.11: Le processus de carbonatation de l'hydroxyde de calcium [63].

➤ **Influence des adjuvants minéraux sur l'absorption de CO<sub>2</sub> dans les bétons autoplaçants**

L'impact des additifs minéraux sur la carbonatation du béton reste relativement peu étudié dans la littérature. Les comparaisons les plus courantes se font souvent entre le béton autoplaçant composées de filler calcaire et le béton ordinaire de même classe de résistance. Plusieurs études [21, 64, 65] se sont penchées sur cette comparaison pour évaluer la résistance à la carbonatation. Les résultats ont révélé une légère différence dans la fragilité du béton autoplaçant à base de filler, mais l'écart observé dans les niveaux d'épaisseur de calcification parmi ces deux catégories de béton n'est pas notable..

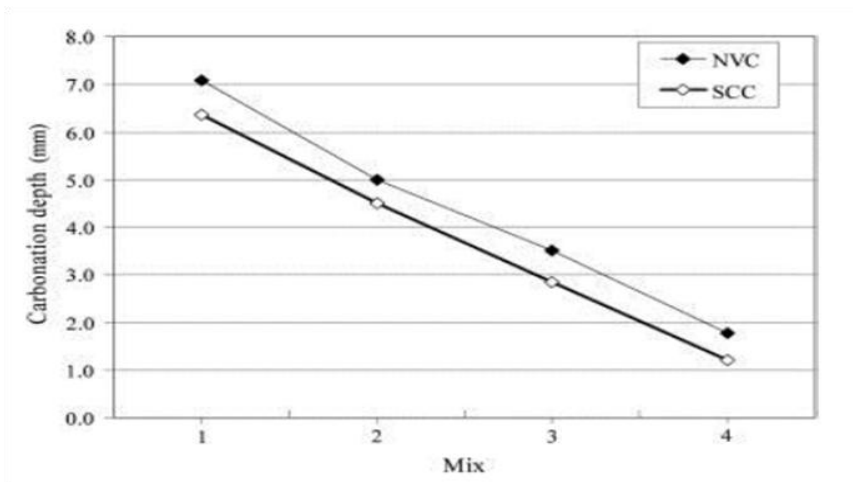


Figure 2.12: Profondeur de carbonatation après 9 mois du béton autoplaçant (SCC) et béton normal vibré (NVC) [65].

Dinakar et al [66] ont mené une analyse de comparaison parmi différents échantillons de béton autoplaçant incorporant divers additifs minéraux tels que le filler siliceux (SCC8), le filler calcaire (SCC1) et la cendre volante (SCC9). Leurs conclusions ont révélé l'absence de distinction notable entre ces échantillons en termes de cinétique de carbonatation (Tableau 2.2).

Selon les auteurs [66, 67, 68, 69], l'utilisation de cendres volantes rend le béton plus dense. Cependant, une grande quantité de  $\text{Ca(OH)}_2$  est consommée lors de son hydratation, ce qui entraîne une pénétration plus profonde de la carbonatation. Cela n'a pas d'effet significatif sur la résistance des bétons autoplaçants à l'absorption de  $\text{CO}_2$ .

Dinakar et al [66] ont étudié l'impact de différentes proportions de cendres volantes (0, 10, 30, 50, 70 et 85%) concernant l'absorption de  $\text{CO}_2$  des bétons autoplaçants. Leurs observations ont montré un accroissement de la profondeur de carbonatation en fonction de la volume croissante de cendres volantes, en particulier pour les BAP ayant des résistances faibles à moyennes.

Selon Rackel [70], les matrices de ciment contenant du métakaolin ou des fumées de silice montrent une avancée plus rapide du dioxyde de carbone dans la matrice par rapport à celles ne contenant pas ces ajouts, du fait de la modeste concentration en portlandite.

Dans son étude comparative, Rackel [70] a confronté des BAP témoins (composés à 100% de CEMI) avec des bétons autoplaçants contenant 75% de CEMI et 25% de métakaolin (Figure 2.15). Il a opté pour illustrer la progression de l'absorption de  $\text{CO}_2$  selon la durée.

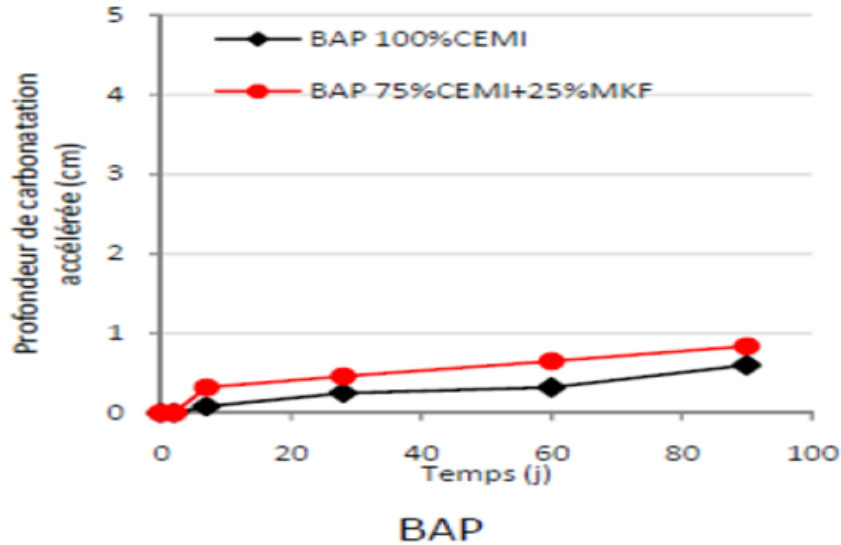


Figure 2.13: Progressions des niveaux d'absorption de CO<sub>2</sub> rapide au fil du temps [70].

Les bétons contenant du métakaolin ont affiché une profondeur accrue d'absorption de CO<sub>2</sub> par rapport aux bétons témoins composés à 100% de CEMI.

Bilaribi O [1] teste la carbonatation naturelle sur des éprouvettes de béton autoplaçant avec des différents additifs minérales (pouzzolane, Vase calcinée), comme suit:

Trois spécimens de 7 x 7 x 28 cm<sup>3</sup> pour chaque composition des bétons autoplaçants ont été stockés à l'air libre dans le laboratoire. La mesure de la profondeur d'absorption de CO<sub>2</sub> a été effectuée après une exposition de 15 mois. Les niveaux d'absorption de CO<sub>2</sub> après cette période sont illustrés dans la figure 2.16.

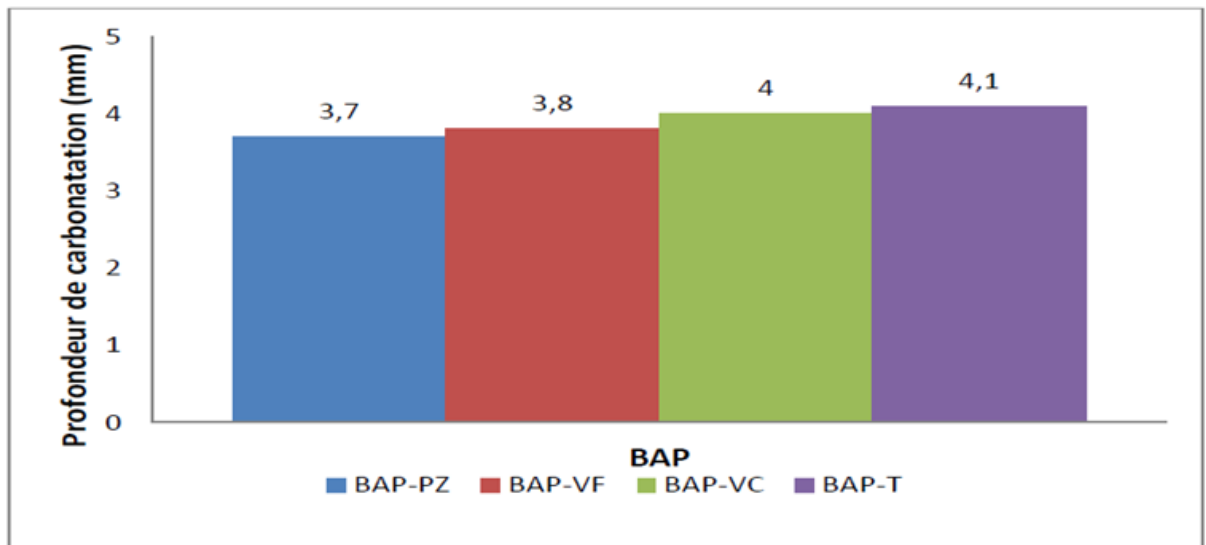


Figure 2.14: Profondeur d'absorption de CO<sub>2</sub> naturelle des BAP étudiés, après 15 mois à l'air ambiant du laboratoire [1].

BAP PZ : béton autoplaçant élaboré à partir de pouzzolane.

BAP T : béton autoplaçant témoin.

BAP VF : béton autoplaçant élaboré à partir de VASE de barrage Fergoug - Ouest Algérie.

BAP VC : béton autoplaçant élaboré à partir de VASE de barrage Chorfa - Ouest Algérie.

Contrairement aux résultats précédents, ce graphique montre que la pouzzolane et la vase calcinée ont un effet positif sur la résistance du béton à la carbonatation.

La carbonisation accélérée a également été étudiée sur des échantillons avec les mêmes formulations précédentes, et les résultats sont enregistrés sur la figure 2.17 :

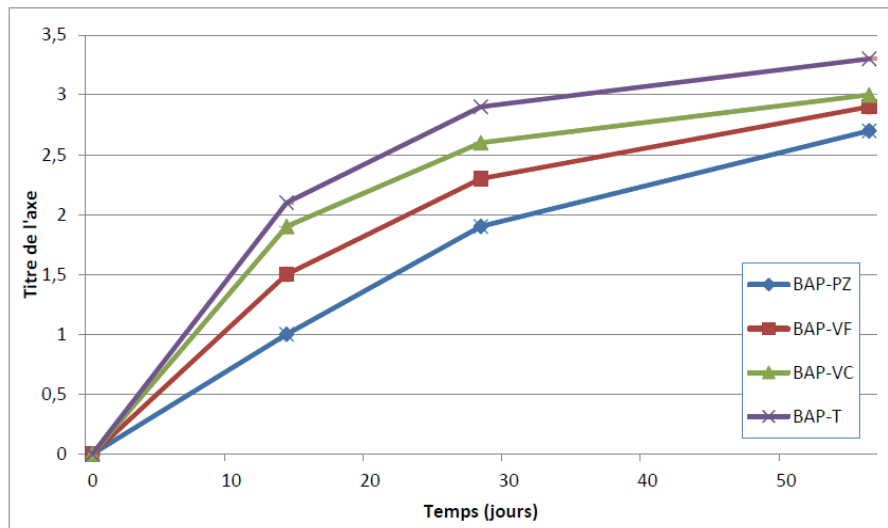


Figure 2.15: Développement de la profondeur de carbonatation accélérée des BAP [1].

D'après les données des courbes de la figure 2.17, Les mesures des niveaux de carbonatation pour les bétons autoplaçant (BAP) oscillent entre 1,9 et 2,9 mm après un laps de 28 jours, démontrant ainsi une bonne résistance de ces BAP à la carbonatation.

Les diverses études recueillies de la littérature ainsi que les recherches menées révèlent un impact variable des additions minérales sur la endurance du béton à la carbonatation, pouvant être soit négatif soit positif.

### 2.5 Essais actuels évaluant la pérennité du béton face aux attaques chimiques

Actuellement, divers essais non normalisés sont disponibles pour évaluer la durabilité du béton face aux agressions chimiques. Ces tests sont principalement conçus pour se trouver employés en laboratoire, bien qu'ils se trouvent aussi des techniques applicables sur site. Par exemple, l'évaluation de la texture d'une surface altérée peut donner une indication sur son niveau de détérioration.

Il est essentiel que les essais en laboratoire soient effectués dans des conditions authentiques. L'utilisation d'acides concentrés peut entraîner la dissolution de tous les types de ciments, rendant difficile l'évaluation de leur qualité relative. Il est donc primordial pour démontrer de vigilance lors de l'analyse des résultats des essais rapides.

Les tests évoqués dans divers articles impliquent généralement l'exposition d'éprouvette de béton de forme prismatique à des séries d'attaque, souvent dans un mélange acide. Cette technique, alternant des phases de plongée et de dessiccation, a pour objectif d'accélérer l'effet de l'attaque chimique. À l'issue de ces tests, les blocs sont souvent nettoyés pour retirer les portions de béton instables.

Différents critères peuvent être employés pour évaluer et contraster les altérations:

- La diminution de volume
- La perte de masse
- La diminution de résistance en compression
- Le Variation de PH du mélange de simulation
- La concentration en calcium du mélange de simulation
- La profondeur d'infiltration de l'acide.
- La profondeur d'Absorption de CO<sub>2</sub>.

Une réduction de volume peut résulter de la détérioration de la pâte de ciment durcie ou du déplacement des granulats de la matrice. L'impact acide peut aussi apparaître sous la couche du béton, découlant de la dissolution des substances en profondeur. Vu que la pâte de ciment et les granulats affichent des densités variées, et que la densité de la pâte peut changer localement, il est approprié d'examiner à la fois la réduction de volume et la diminution de poids. Une fluctuation de volume observée peut, en effet, être associée à des pertes de masse variées.

## 2.6 Conclusion

La durabilité est l'un des critères les plus importants à étudier dans le domaine de la recherche sur différents types de béton. Parce que c'est elle qui détermine la permanence des constructions et leur performance pendant la période de leur travail (leur vie). Nous avons noté dans ce chapitre qu'elle est liée à plusieurs facteurs qui la contrôlent, tels que la qualité des matériaux qui y sont utilisés et la nature de l'environnement qu'elle contient. Nous avons rassemblé de nombreuses informations dans ce chapitre sur le béton autoplaçant, car il s'agit d'un type différent du béton ordinaire, sa durabilité est donc également différente, car ses composants supplémentaires le rendent plus durable que le béton ordinaire dans la plupart des cas. Cependant, il est impératif que si nous voulons construire des bâtiments et des constructions en béton autoplaçant, nous devons réaliser diverses expériences sur eux, qui testent leur durabilité, et qui doit être compatible avec la nature du site, ainsi la proportion de certains composants du béton peut être contrôlée pour le rendre plus compatible avec L'environnement qui s'y trouve.

# Chapitre 3 : Maximisation des ressources : Sable des dunes et VASE dans la conception du béton autoplaçant

---

## 3.1 Introduction

L'Algérie est l'un des plus étendus pays du globe en ce qui concerne la superficie, couvrant plus de 2,3 millions de kilomètres carrés. La nation se caractérise par une vaste variété climatique, comprenant des climats méditerranéens, continentaux et désertiques, expliquant ainsi l'accumulation de ses différentes ressources naturelles. Ce chapitre s'articule autour de la valorisation de sable des dunes et des sédiments de dragage (vase) dans la formulation du béton autoplaçant. Nous découvrirons ces deux matériaux, leur définition et la source de chacun d'eux, ainsi que la méthode de leur préparation et les domaines de leur utilisation.

Ces deux matériaux sont considérés comme des sources renouvelables et inépuisables, et c'est ce qui a poussé les chercheurs à essayer de trouver des moyens pour les exploiter. L'un de ces domaines qui incitent les scientifiques à rechercher c'est le béton car il est constitué d'un groupement de composants, tel que le sable et les additifs, et cela laisse place à l'étude de l'effet d'une compensation partielle ou totale de ces composants avec ces nouveaux matériaux.

## 3.2 Sable des dunes

**3.2.1 Le sable :** Le sable se compose de matériaux et de minéraux qui varient en proportions selon l'endroit, donnant lieu à différentes couleurs comme le blanc, le noir, le vert, voire le rose. À travers une loupe, on peut observer des milliers de grains aux tailles et formes variées. Le quartz, sous forme de dioxyde de silicium, prédomine dans la composition du sable, accompagné de divers minéraux.

La majeure partie du sable provient de la fragmentation des roches due à des processus d'érosion façonnés par des facteurs météorologiques comme la pluie et les variations de température, s'étalant sur des millions d'années. Les rivières et les vents ont dispersé les particules de quartz vers divers lieux, donnant naissance aux

Sable de dunes continentales. Quant au sable organique, il découle des coquillages, des squelettes d'organismes marins et des vestiges de récifs coralliens.



Figure 3.1 : le sable.

### 3.2.1.1 Constitution chimique

La **Constitution** chimique de ces sables est élémentaire : ils sont majoritairement constitués de silice à plus de 95 %, avec une présence de 1 à 2 % de calcaire ainsi que des traces d'oxydes variés. Cette composition donne au sable une couleur blanche légèrement jaunâtre ou ocre, le rendant sujet au dessèchement et à une faible cohésion en surface [71].

### 3.2.1.2 Granulométrie

Le diamètre des particules les plus larges dans les sables des dunes du Sahara avoisine les 0,5 mm, atteignant leur maximum près de la roche mère et diminuant progressivement en s'éloignant de celle-ci. Parallèlement, ces particules adoptent des formes toujours plus circulaires. Les particules les plus subtils présentent un diamètre d'environ 0,04 mm. Avec un coefficient d'uniformité ( $CU = D_{60} / D_{10}$ ) d'environ 1,8 et un coefficient de courbure ( $CC = D_{302} / [D_{10} \cdot D_{60}]$ ) d'environ 10, Cela correspond à un sable extrêmement fin mais mal réparti en tailles. Les courbes granulométriques, illustrées dans la figure 3.2, soulignent les différences entre les sables de dunes récoltés dans deux régions distinctes du Sahara, en Tunisie [72] et en Mauritanie [73], [71].

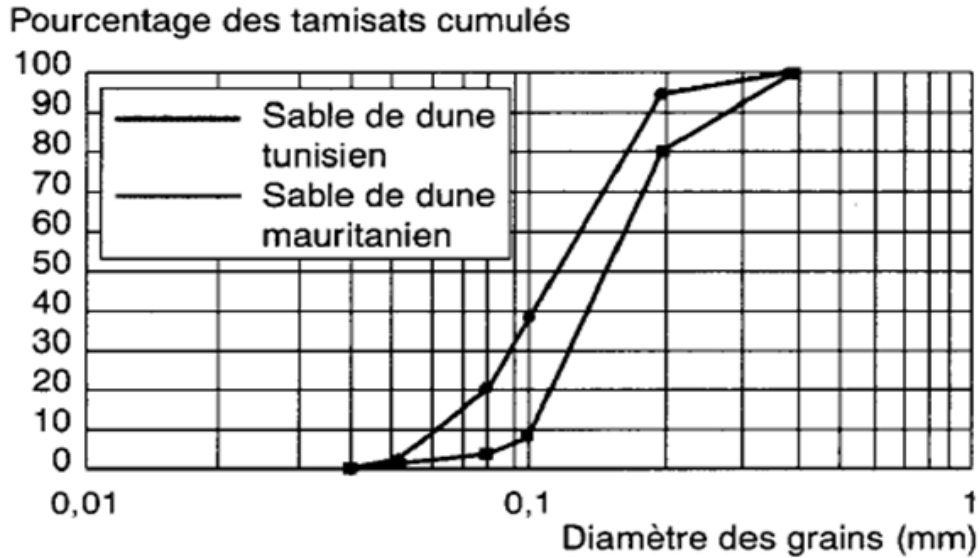


Figure 3.2 : Profils granulométriques de deux sables dunaires [71].

$D_{60}$ ,  $D_{10}$  et  $D_{30}$  correspondent respectivement aux diamètres des grains pour lesquels 60 %, 10 % et 30 % du matériau total passent à travers le tamis, selon la courbe granulométrique.

### 3.2.1.3 Propreté

Le sable de dunes présente une quasi-absence de résidus d'argile. Son seuil de liquidité, notée  $W_L$ , se situe aux alentours de 25, et son seuil de plasticité n'est pas déterminable. L'équivalent de sable dépasse les 60 %. Par ailleurs, la valeur du bleu est d'environ 0,1 [71].

### 3.2.1.4 Réponse mécanique

Des tests de densification et de découpe directe ont été conduits par Ould Sid et ses collaborateurs [73], aboutissant à des conclusions significatives :

L'impact de l'humidité sur la densification demeure peu notable lorsque celle-ci demeure basse (0 à 6 %).

La cohésion présente une valeur très réduite, estimée aux alentours de 5 kPa.

L'angle de friction interne oscille entre 30 et 35°, variant en fonction de la densité du sable.

Ces paramètres mettent en évidence la capacité potentielle du sable de dunes à afficher des propriétés mécaniques satisfaisantes même en cas de compacité modeste, pourvu qu'il soit à l'abri des effets du vent.

En outre, le coefficient de portance C B R de ces sables, évalué à partir du poids volumiques et le contenu en eau idéal selon le Proctor modifié, se révèle relativement bas, aux environs de 10 %. Ceci exclut, entre autres, toute utilisation exclusive de ces sables pour constituer des assises de chaussée [71].

**3.2.2 Les dunes :** Les dunes représentent un relief ou une structure formée essentiellement de sable. Ce terme appartient au vocabulaire topographique, géographique et géomorphologique, désignant des formations relativement récentes à l'échelle géologique. Les ensembles dunaires englobent des formations littorales, terrestres et aquatiques de diverses dimensions, superficies, époques et mouvements. Les mécanismes éoliens ou aquatiques sont aux débuts de l'édification, de développement et des déplacements des dunes ainsi que des massifs dunaires, déterminant leurs formes générales et détaillées (modelés). D'autres termes locaux tels qu'erg, dune littorale, croc, garenne, entre autres, sont utilisés pour décrire spécifiquement certains types de dunes. Ces termes, bien que souvent associés à des régions particulières, peuvent parfois être employés de manière plus générale pour caractériser un type spécifique de dune [74].

### 3.2.2.1 Procédés de création

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et où la végétation n'est pas suffisante pour le stabiliser, telles que les déserts, les côtes ou les lits de rivières à faible débit. Le sable, soumis à l'érosion, est déplacé par le vent dans un phénomène connu sous le nom de déflation. Transporté près du sol par un mouvement appelé saltation, il s'accumule lorsque la vitesse du vent diminue, principalement du côté abrité [75].

Ces dunes peuvent émerger naturellement en évoluant à partir de ce qu'on appelle des proto-dunes [76]. La formation de petits barchans à partir de ces proto-dunes se déroule en cinq phases distinctes. Au début, des plaques de sable de quelques centimètres de hauteur se forment. Puis, soumises aux vagues éoliennes, ces plaques croissent progressivement lors de la deuxième phase. L'accumulation de sable se poursuit, épaississant ces plaques qui deviennent des proto-dunes de 25 à 40 cm d'épaisseur durant la troisième phase, caractérisées par un glissement des grains sur leurs pentes du côté sous le vent. La quatrième phase voit l'émergence d'une petite dune mesurant de 1 à 1,5 mètre de hauteur, avec une courbe de pente du côté sous le

vent. Enfin, la dernière phase est marquée par la formation d'un barchan en forme de croissant, atteignant 1 à 2 mètres de hauteur [77].

### 3.2.2.2 Les formes de dunes

Les dunes se présentent sous trois aspects distincts:

- La barkhane adopte une configuration en forme d'arc, avec une courbure du côté exposé au vent. Elle se forme là où l'apportement de sable est limité et sous l'influence de vents soufflant dans une seule direction (Figure 3.3A).
- La dune parabolique se distingue par sa forme dissymétrique en fer à cheval, concave du côté exposé au vent. Souvent stabilisée par la végétation, elle présente une disposition inverse à celle de la barkhane en relation avec l'orientation du vent. Généralement peu mobile, une fois formée, elle a tendance à rester en place (Figure 3.3B).
- Les sioufs, également appelées sif, sont des dunes ayant une silhouette de lance, présentant des vagues allongées qui s'affinent en allant vers un point final (Figure 3.3C) [78].

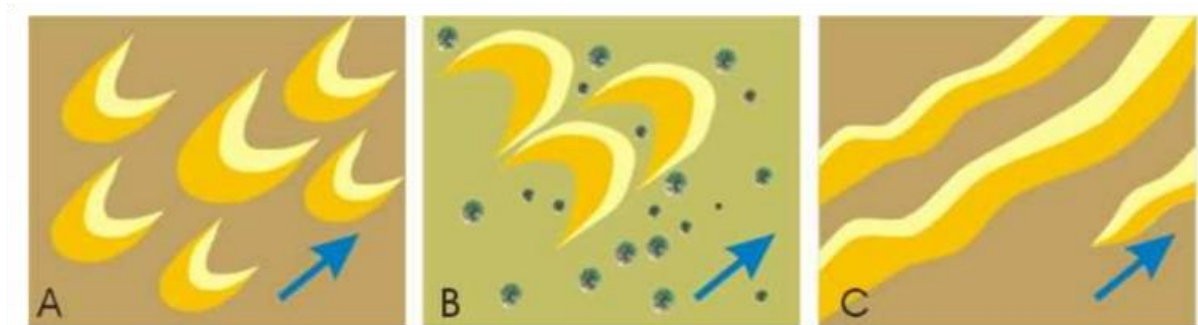


Figure 3.3 : Formes de dunes. A: croissants dunaires; B: dunes en parabole; C: dunes allongées.

L'indicateur bleu désigne l'orientation principale du vent.

### 3.2.3 Utilité de sable de dunes

L'utilité du sable de dunes se manifeste à deux échelles : opérationnel et financière.

**3.2.3.1 Les aspects économiques:** son utilisation présente des avantages évidents. Le sable de dunes offre une économie notable en termes de Le déplacement des matériaux est simplifié, étant donné qu'ils sont largement accessibles en volumes infinis dans plusieurs zones. En outre, son extraction entraîne presque aucun coût additionnel, et son intégration avec divers matériaux peut se réaliser facilement sur le site de construction [79].

### 3.2.3.2 Les aspects techniques

Les aspects techniques du sable de dunes sont significatifs :

- Le sable peut contribuer à densifier les matériaux, améliorant ainsi leurs propriétés géotechniques en augmentant la résistance au frottement interne et en augmentant leur capacité de portance.
- Il est également efficace pour réduire la plasticité des matériaux de base.

### 3.2.4 Exploitation du sable de dunes dans la composition du béton autoplaçant

Ces dernières décennies ont été marquées par un important développement de la recherche sur le BAP, incluant l'emploi des dunes de sable. De nombreuses études se sont penchées sur son utilisation directe en remplacement du sable de carrière, à diverses proportions [80,81, 82, 83, 84]. D'autres ont exploré son rôle en tant qu'addition minérale dans ce type de béton [85, 86, 87]. Parallèlement, certaines recherches ont examiné l'utilisation de ce type de sable en combinaison avec d'autres, tels que le sable de carrière, le sable d'Ouade, ou le sable de rivière, dans les bétons autoplaçants en tant que sable binaire ou ternaire [81, 82, 88].

Ces recherches ont abouti à des conclusions encourageantes, suggérant la probabilité d'intégrer cette ressource naturelle abondante dans la production de béton autoplaçant, offrant des qualités similaires à celles obtenues avec l'utilisation du sable traditionnel.

### 3.2.5. Compensation de sable de carrière par sable de dunes

Khattab E [82] a travaillé sur deux groupes de formulations du BAP, groupe A et groupe B, dans lesquels le groupe A utilisait  $350 \text{ Kg/m}^3$  de ciment et dans le groupe B  $400 \text{ Kg/m}^3$  de ciment et remplaçait le sable de carrière par des sables de dunes de proportions différentes (0,10, 25, 50, 75,100%) dans les deux groupes, d'où on obtiendrai les résultats suivants :

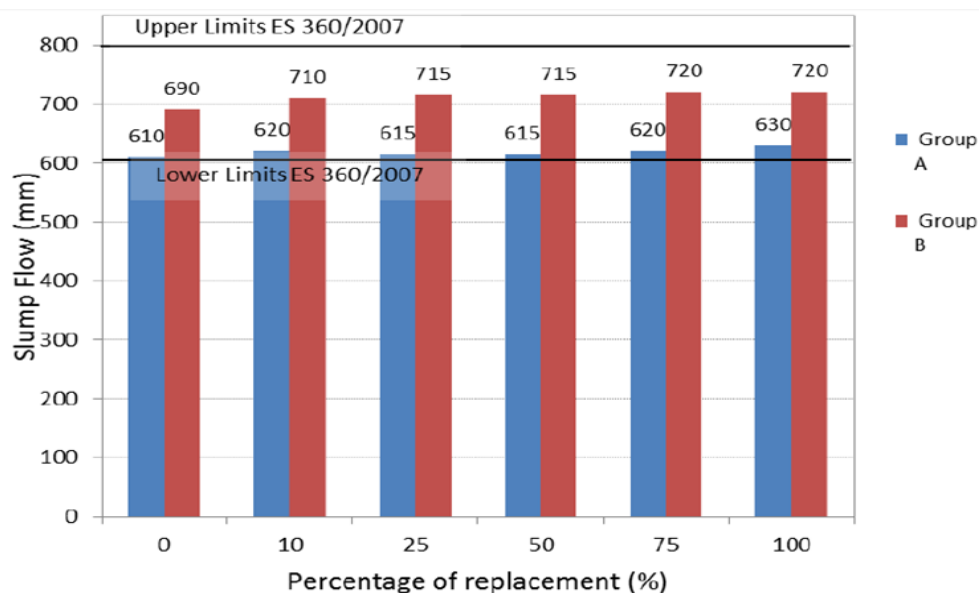


Figure 3.4: Etalement des BAP étudiés [82].

L'observation de ce graphique montre une corrélation entre l'accroissement de la part de sable de dunes ajoutée au BAP et l'augmentation de son étalement. De plus, toutes les formulations de BAP étudiées répondent aux spécifications techniques égyptiennes, démontrant ainsi leur conformité aux normes établies.

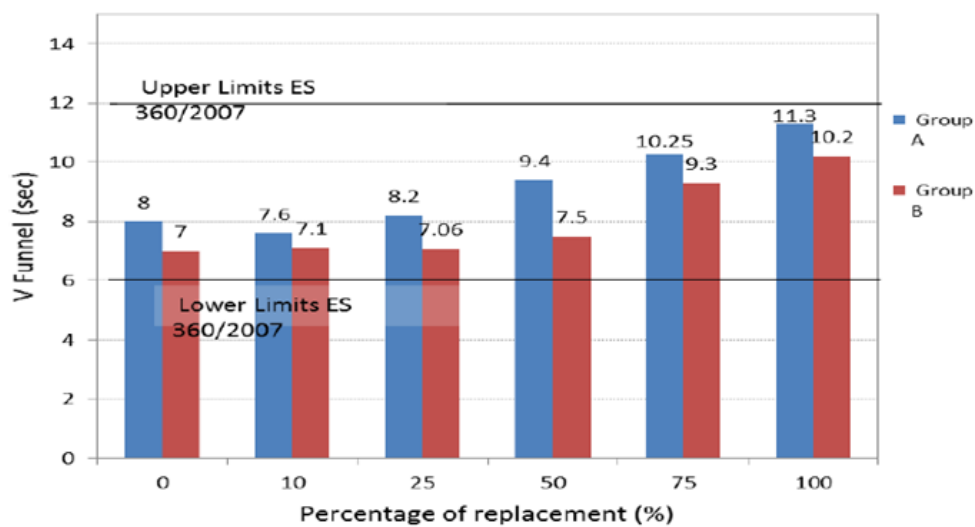


Figure 3.5: Essai d'entonnoir en V des BAP étudiés [82].

Il est clair que tous les résultats du test de l'entonnoir en V aient atteint les limites de la spécification technique Egyptienne,

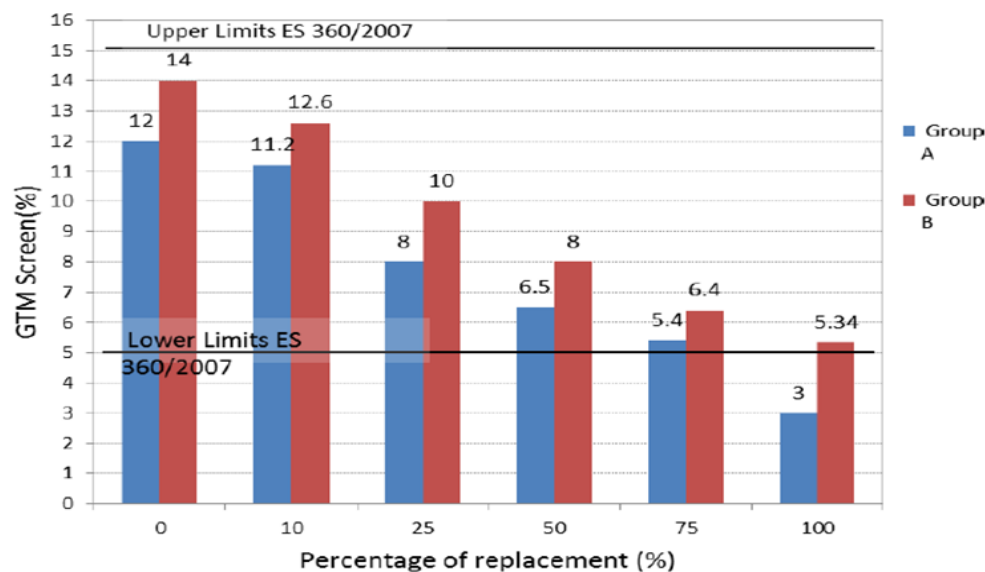


Figure 3.6: Stabilité au tamis (GTM screen) des BAP étudiés [82].

Toutes les formulations ont affiché des résultats conformes aux valeurs spécifiées, à l'exception de celle composée à 100% de sable de dunes.

Les recherches, basées sur les résultats de Khattab [82], indiquent plutôt que la substitution du sable concassé (de carrière) par du sable de dunes atteignant un pourcentage de 75% préserve les caractéristiques rhéologiques du béton autoplaçant.

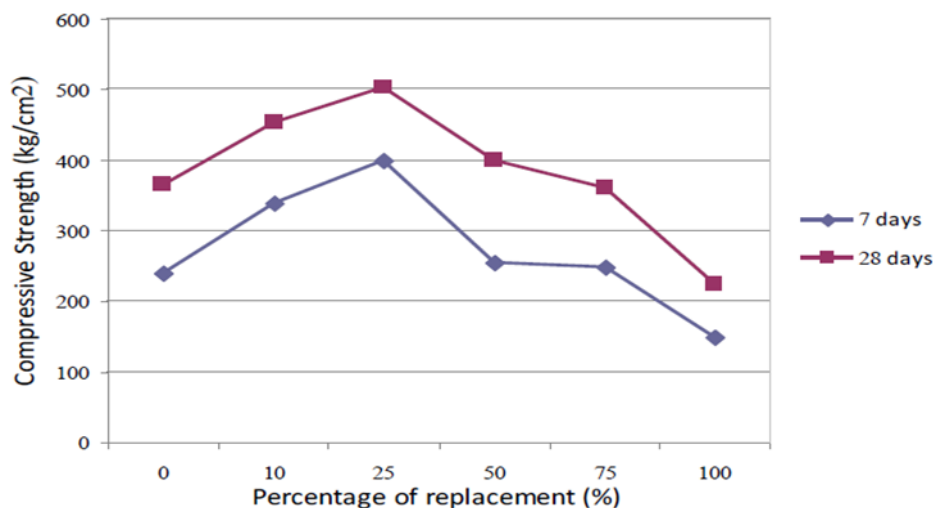


Figure 3.7: Résistance à la compression de group A des BAP étudiés [82].

On remarque que l'incorporation de sable de dunes à un rapport inférieur à 25% affecte positivement la résistance à la compression du béton autoplaçant à 7 et 28 jours.

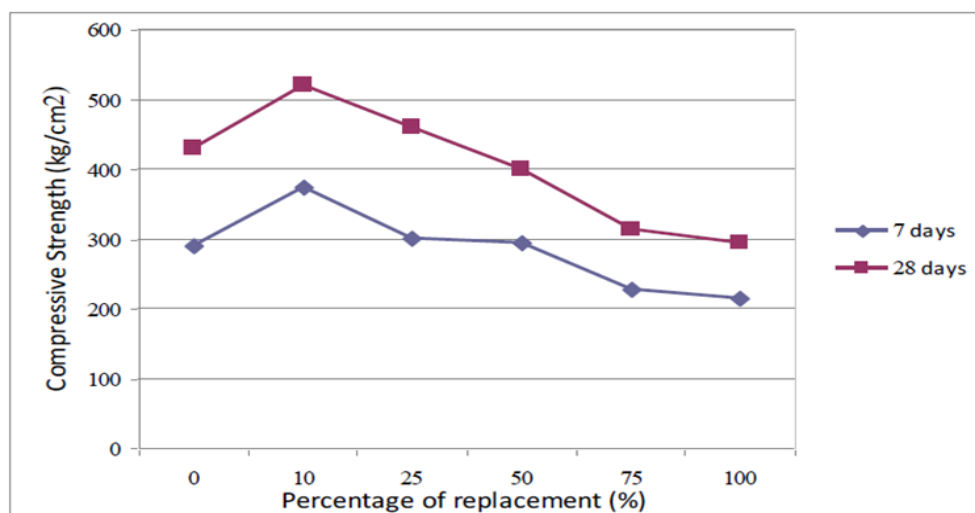


Figure 3.8: Résistance à la compression de group B des BAP étudiés [82].

On remarque que l'incorporation de sable de dunes à un rapport inférieur à 10% affecte positivement la résistance à la compression du béton autoplaçant, Ensuite, l'effet se transforme en effet négatif à cause du volume différent de ciment.

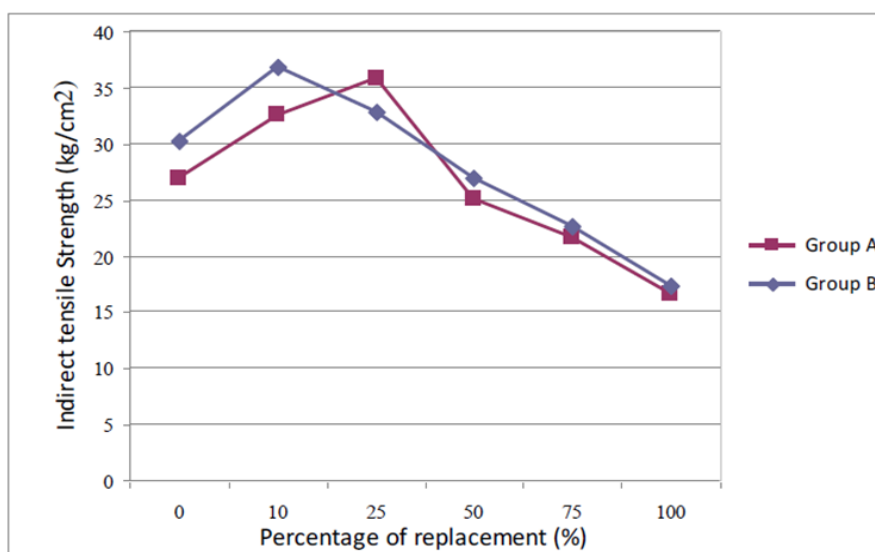


Figure 3.9: Résistance à la traction des BAP étudiés [82].

Dans cette expérience, Khattab a trouvé les mêmes résultats avec l'essai de résistance à la compression.

En fin, Khattab [82] a conclu que le meilleur pourcentage de compensation du sable ordinaire par le sable de dunes est de 25%, afin que nous puissions obtenir un BAP répondant aux normes à l'état humide et solidifié.

Zeghichi L et al [80] ont conduit une étude sur le béton autoplaçant en utilisant exclusivement du sable de dunes à 100%. Ils ont divisé ce béton en deux groupes distincts, le premier avec un taux E/C de 0,5 et le second avec un rapport E/C de 0,55. Dans l'ensemble, les deux groupes ont varié le pourcentage de superplastifiant (1 %, 1,5 %, 1,75 %, 2 %) pour obtenir différentes formulations de ce béton. Ensuite, ils ont évalué ses caractéristiques à l'état frais et après durcissement, et ont enregistré les résultats obtenus comme suit :

- l'état frais :

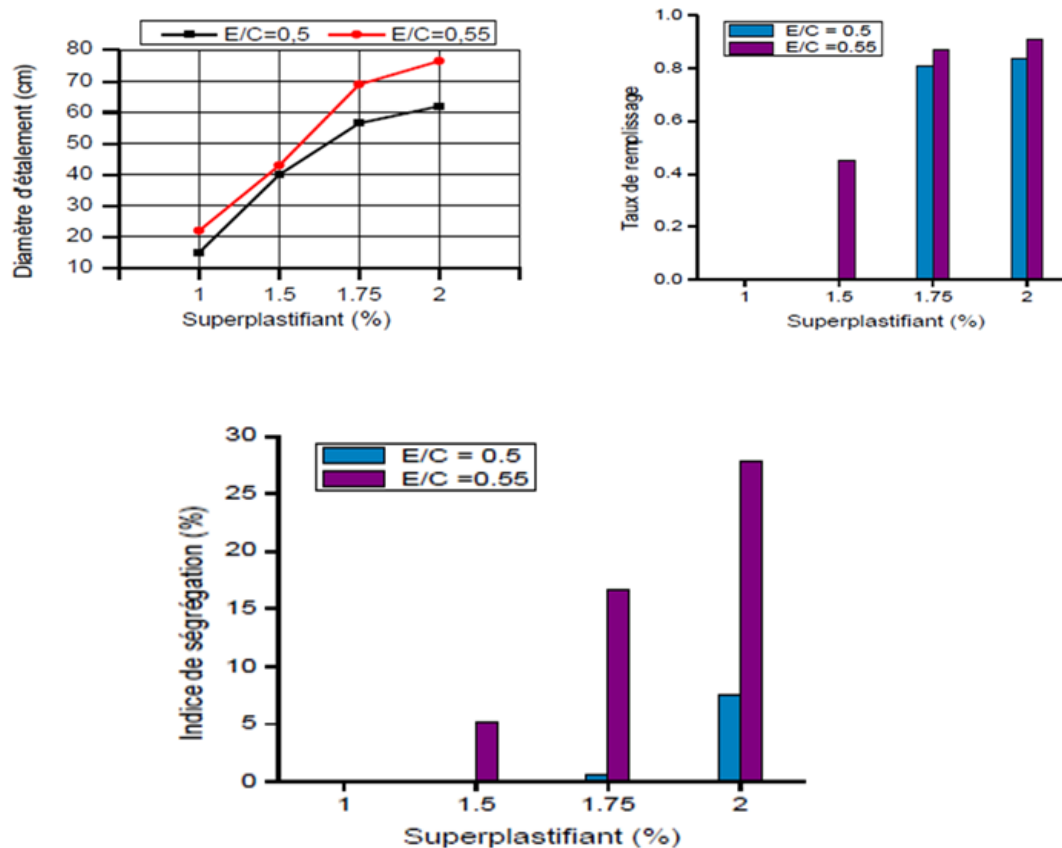


Figure 3.10: Essais à l'état frais (étalement, boîte en L, stabilité au tamis) [80].

- l'état durci :

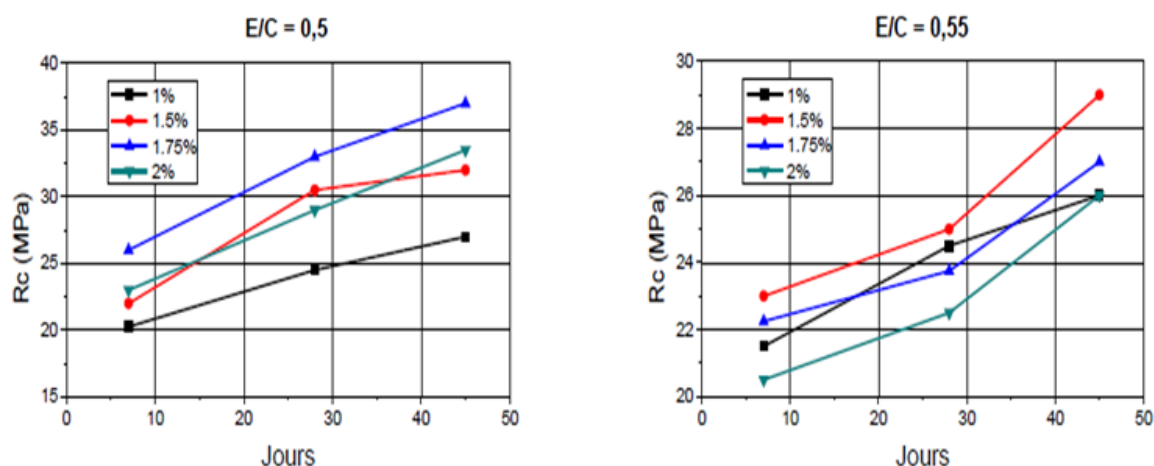


Figure 3.11: Essai de résistance à la compression [80].

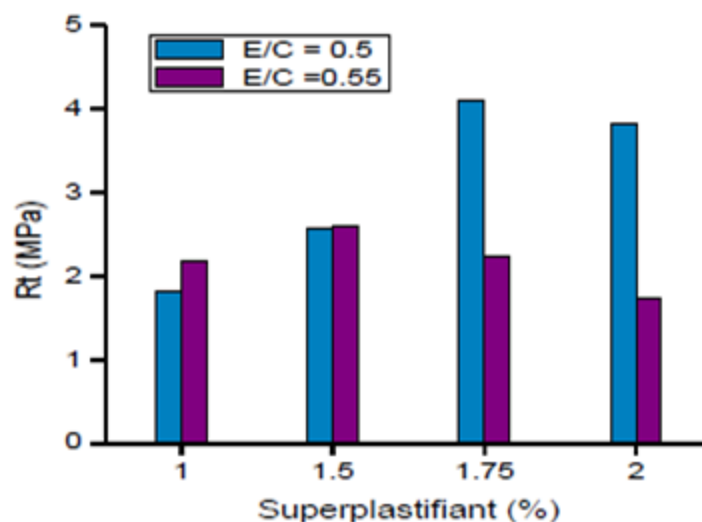


Figure 3.12: Test de résistance à la traction [80].

À la base de ces résultats obtenus à partir de cette étude, Zeghichi L et al [82] ont conclu que nous pouvant formuler un BAP constitué de sable de dunes (100%) répond aux critères des normes à l'état frais et durci en suivant les compositions ultérieures:

- 1,75 % de superplastifiant avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,5.
- 2 % de superplastifiant avec un rapport E/C de 0,5.
- 1,75 % de superplastifiant avec un rapport E/C de 0,55.

D'autre part, Adekunle S et al [84] ont réalisé une recherche sur le béton autoplaçant en utilisant exclusivement du sable de dunes, en adoptant une méthode visant à améliorer la densité du tassement des particules pour réduire le pourcentage de vides. La philosophie sous-jacente à ce tassement de particules est de combiner les

grains de manière à obtenir la plus faible porosité possible, ce qui rend possible de minimiser le volume de liant requise. On estime que le degré de compactage dépend principalement de trois paramètres : la répartition des dimensions des grains, la configuration des particules et la méthode de traitement du remplissage [89]. Les résultats obtenus par Adekunle S et al [84] indiquent que cette méthode améliore significativement les performances du BAP à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

Nous avons remarqué que le sable de carrière a été complètement substitué par le sable de dunes, et que le rôle du sable de dunes dans la formation du béton autoplaçant est apprécié.

### 3.3 La vase (sédiment de dragage)

#### 3.3.1 Définition

Les sédiments sont constitués de particules et de molécules qui se regroupent sous l'effet de la gravité. Plusieurs forces naturelles interviennent dans leur transport et les amassent dans des endroits précis comme les fonds de vallées, les barrages et les cours d'eau.

Dans les barrages, l'eau qui s'y déverse depuis les pentes et les affleurements rocheux entraîne avec elle des particules de sol, formant des couches sous le niveau de l'eau. Avec le temps, la quantité et l'épaisseur de ces dépôts sédimentaires augmentent, phénomène connu sous le nom d'envasement [90].

Les sédiments se distinguent par deux origines distinctes :

- **Origine endogène** : Ces sédiments comprennent les débris de grandes plantes aquatiques ainsi que les restes de carcasses d'animaux. Ils sont produits localement par l'environnement [1].
- **Origine exogène** : Ces particules, d'origine naturelle ou humaine, proviennent de diverses sources telles que l'usure des terres, la dégradation de matières végétales, l'introduction de matières en équilibre, d'éléments biologiques, de substances nutritives, et de micropolluants provenant des résidus ruraux, manufacturiers et ménagers. Ces particules sont transportées par l'écoulement de l'eau ou les rafales de vent [1].

### 3.3.2 Composition des sédiments

La composition des sédiments est complexe, comprenant à la fois des éléments inorganiques et organiques, ce qui les rend hautement hétérogènes. Cette diversité représente l'une des fondamentales complications dans leur analyse [90]. Les sédiments dragués se divisent en trois phases :

- **Phase eau:** Le taux d'humidité, en relation avec la matière sèche dans les récipients, varie généralement de 50 à 300%. Cette fraction présente une grande variabilité, soumise à divers éléments comme les modalités de dragage et la localisation des sédiments. On distingue généralement l'eau libre, l'eau capillaire, l'eau colloïdale et l'eau superficielle [90].
- **La phase inorganique:** Cette portion est essentiellement composée de minéraux issus de la croûte continentale ainsi que de résidus de coquillages. Cette phase est caractérisée par la présence de divers minéraux, dont les silicates, les carbonates et les argiles. Les particules inorganiques sont souvent entourées d'hydroxydes de fer et de manganèse, ainsi que de matières organiques, ce qui leur permet d'avoir une capacité d'adsorption significative envers les polluants. Parmi les minéraux essentiels de cette matrice, on trouve le feldspath, le quartz, ainsi que plusieurs types d'argiles, en particulier la kaolinite, l'illite et la smectite [90].
- **Phase organique:** Les composés organiques présents dans les sédiments sont généralement d'origine naturelle, provenant de résidus végétaux, de micro-organismes ainsi que de colloïdes humiques. Cette phase se compose de polymères naturels qui jouent un rôle crucial en tant qu'agents de complexation. La phase organique se divise en deux catégories distinctes :
  - Les acides non humiques :* Il s'agit de composés relativement connus, comprenant des acides organiques, des acides aminés, des protéines et des glucides.
  - Les acides humiques :* Cette fraction représente entre 80 et 90 % de l'ensemble organique. On peut identifier deux grandes catégories de composés humiques : les acides humiques, qui ne se dissolvent pas dans l'eau mais le font dans des environnements alcalins, et les acides fulviques, qui constituent la part prédominante car ils se dissolvent dans des milieux acides et basiques. [90].

En résumé, les constituants principaux de la vase se répartissent en quatre composants fondamentaux [1]:

- 1- Le composant minéral, constitué de quartz, de feldspaths et de carbonates;
- 2- La partie argileuse, comprenant la kaolinite, l'illite et les montmorillonites;
- 3- La composante organique, englobant les résidus végétaux, les microorganismes, ainsi que les acides fulviques et humiques;
- 4- Une quantité d'eau, existant sous différentes formes.

### 3.3.3 Le dragage des sédiments

Le dragage des sédiments est le processus d'extraction des dépôts accumulés au fond des plans d'eau. Son objectif principal est de nettoyer les réservoirs, tels que les barrages, en éliminant les sédiments qui limitent leur capacité à stocker l'eau. Cette action vise aussi à prévenir les risques d'inondations associés à l'accumulation excessive de sédiments. Ces dépôts sont souvent considérés comme des contaminants indésirables pour la qualité de l'eau dans les barrages. Par ailleurs, les méthodes de dragage sont parfois utilisées pour exploiter ces sédiments dans divers domaines.

Le processus de dragage implique l'utilisation d'équipements spéciaux qui varient en fonction des lieux. On retrouve des navires spécialisés, des dragues hydrauliques ou mécaniques, fixes ou mobiles, ainsi que des systèmes de flottaison. Une fois les matériaux dragués collectés, ils sont soit stockés à bord des navires, soit évacués hors du plan d'eau via des tuyaux dédiés.



Figure 3.13: Engin mécanique de dragage.

### 3.3.3.1 Procédures de dragage

Il existe différentes Méthodes de dragage, sélectionnées en fonction des conditions spécifiques et basées sur des expériences antérieures ainsi que des études scientifiques :

1- *Le dragage en eau*: Cette méthode implique le relèvement et la diffusion des sédiments par l'intermédiaire d'un courant, qu'il soit naturel ou provoqué artificiellement. Les sédiments sont soit dispersés dans la zone environnante, soit transférés vers une zone spécifique définie à cet effet [1].

2- *Les dragages hydrauliques*: Cette méthode fait usage de pompes centrifuges qui aspirent les dépôts sous forme de boues liquides à forte humidité à travers un tube d'élinde [1].

3- *Les dragages pneumatiques*: Basés sur un principe similaire aux dragues hydrauliques, cette méthode implique la fluidisation du sol par l'application d'air comprimé ou d'eau sous tension. Cela permet de remettre les sédiments en suspension, facilitant leur déplacement par les courants [91].

4- *Les méthodes d'extraction mécanique*: Elles fonctionnent grâce à l'intervention d'un outil, comme un seau ou un outil de fouille, qui agit immédiatement sur les matériaux à extraire [1].

### 3.3.4 L'optimisation des matériaux d'extraction (vase)

Chaque année, des millions de tonnes de vase, ou de sédiments, sont extraites des rivières, des barrages, voire des ports à travers le monde. Actuellement, ce matériau est considéré comme abondant et pratiquement inépuisable. Cependant, sa gestion et son stockage posent souvent problème, nécessitant l'implication des chercheurs et des décideurs pour trouver des moyens de valoriser ces sédiments, notamment dans l'industrie, l'agriculture et la construction, entre autres.

L'agriculture représente l'un des secteurs clés pour exploiter ces sédiments de dragage et améliorer la productivité des terres agricoles. Un grand nombre de recherches ont été réalisées afin de saisir les effets positifs et négatifs de la vase sur les sols agricoles, ainsi que pour évaluer les minéraux et le taux de sels qu'elle contient [92] ... etc.

Le vase est souvent utilisé comme engrais riche en divers minéraux nécessaires à la croissance des cultures agricoles, donnant ainsi une plus grande production et une meilleure qualité.

Dans une recherche axée sur la réutilisation des dépôts d'extraction, Banoune et son équipe [93] ont investigué la possibilité d'employer les sédiments du barrage de Kherrata et de la rivière Soummam (situés dans la wilaya de Bejaia, en Algérie) dans la construction routière après traitement. Cette analyse, basée sur des recherches précédentes, a conclu qu'il était envisageable d'utiliser ces sédiments, préalablement traités, comme sous-couches pour les routes, sous réserve de l'application de techniques spécifiques.

Par ailleurs, une autre étude menée par Nedloussi et ses collaborateurs [94] concentré sur l'évaluation de l'emploi des sédiments du digue de Gargar (wilaya de Relizane) dans le secteur de l'industrie des matériaux de construction. Leurs conclusions ont révélé que les propriétés mécaniques et géologiques de ces dépôts d'envasement permettaient leur utilisation dans la production de briques de construction aux caractéristiques similaires à celles fabriquées avec d'autres matériaux traditionnels du domaine.

Dans un autre domaine d'exploitation des sédiments de barrage, Benasla et ses collègues [95] ont exploré la possibilité d'utiliser ce matériau dans l'industrie cimentière. Leur étude visait à évaluer l'impact du remplacement partiel du ciment à base de pouzzolane fabriquée provenant des sédiments de l'Oued Fodda sur les caractéristiques mécaniques et physiques des mortiers développés. Les résultats obtenus ont indiqué qu'il était envisageable d'utiliser les dépôts de dragage utilisés dans la production du ciment, sous réserve de techniques spécifiques et de quantités calculées pour obtenir un ciment aux propriétés acceptables.

### **3.3.5 L'exploitation des sédiments issus du dragage (vase) pour la préparation du béton autoplaçant (BAP)**

Certaines recherches et initiatives pour profiter parti des dépôts de dragage. des rivières, barrages et ports dans divers domaines, comme l'agriculture, la construction routière et même l'industrie cimentière. Dans le secteur du béton, ces sédiments font également l'objet d'études pour en faire un composant essentiel de ce matériau. Parmi les types de béton, le béton autoplaçant se distingue, et de nombreuses études se concentrent sur l'opportunité d'exploiter ces dépôts. dragués en tant qu'additif minéral pour améliorer les propriétés de ce béton.

Rozas F et al [96] ils ont mené une recherche approfondie sur les sédiments dragués prélevés dans un port espagnol. Leur objectif était d'évaluer la viabilité de ces

sédiments en tant qu'additif minéral pour le béton autoplaçant. Leur recherche, basée sur des expérimentations progressives, visait également à formuler des recommandations pour son utilisation. Leurs résultats ont démontré la compatibilité remarquable de ce matériau avec les composants minéraux du ciment, sa non-toxicité et son innocuité, ainsi que la qualité de sa structure granulaire, autant d'aspects favorisant son intégration dans le béton autoplaçant...etc.

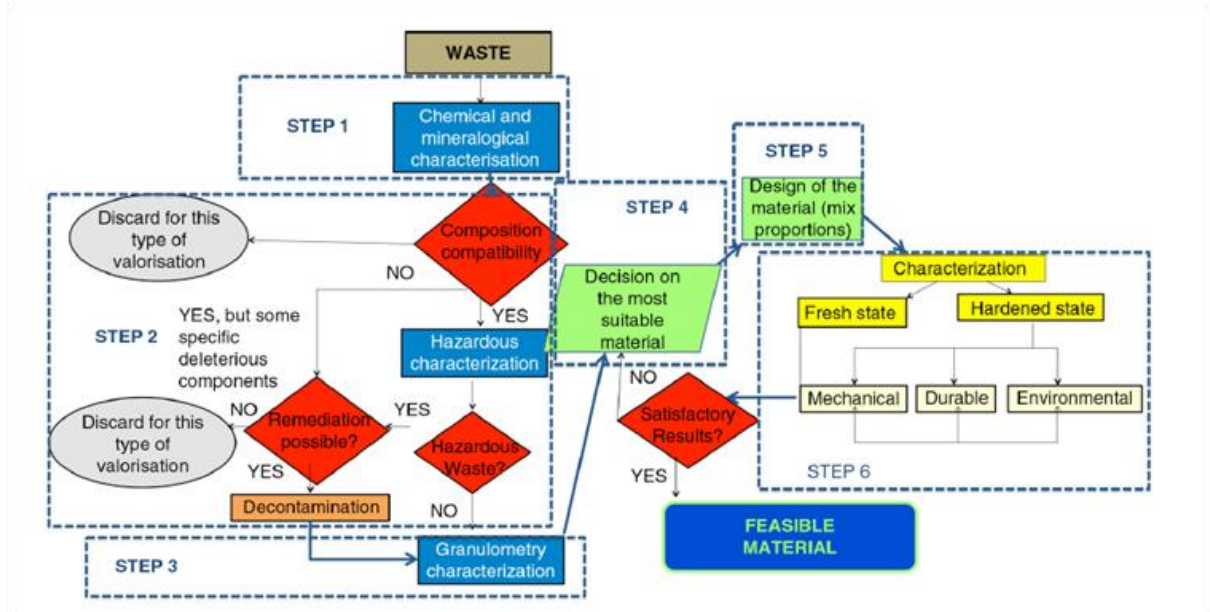


Figure 3.14: Schéma du protocole à suivre pour étudier la faisabilité de utiliser un sédiment de dragage comme composant d'un matériau cimentaire [96].

Cette conclusion énonce la possibilité d'intégrer les sédiments dragués provenant du port méditerranéen espagnol comme additif minéral dans le béton autoplaçant. Elle met en avant la garantie d'atteindre les propriétés mécaniques et rhéologiques requises pour le béton, tout en préservant sa durabilité.

Safi B et al [97] ils ont mené une recherche sur le mortier autoplaçant, explorant l'efficacité et les performances de deux types distincts d'additifs minéraux. Ces additifs comprenaient les sédiments de dragage (vase calcinée) et les déchets de briques moulues, tous deux utilisés dans la construction. L'étude se penchait sur la différence d'efficacité, de performance, ainsi que sur l'impact sur Les caractéristiques viscoélastiques et mécaniques du mortier traité thermiquement. Les échantillons de mortier ont été analysés à la fois dans leur état frais et dans leur état durci, et le groupe a obtenu les résultats suivants :

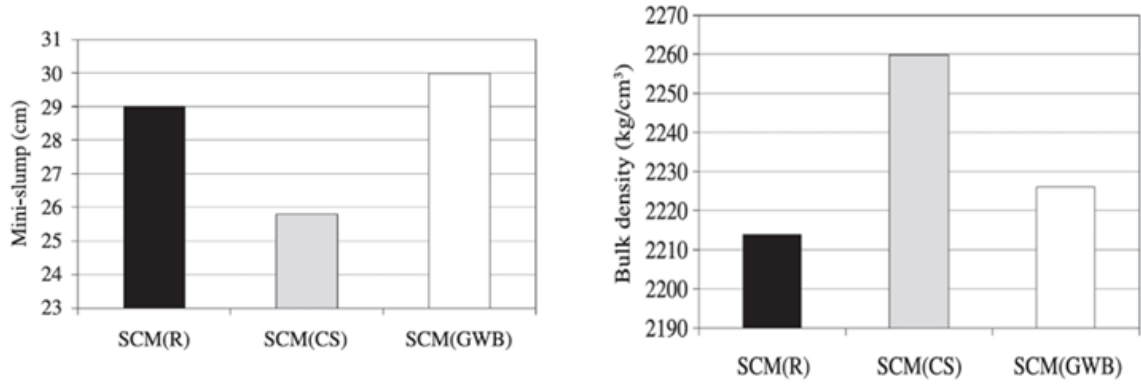


Figure 3.15: Essai d'écoulement Mini- cône et la densité apparente des échantillons de mortiers autoplaçants étudiés [97].

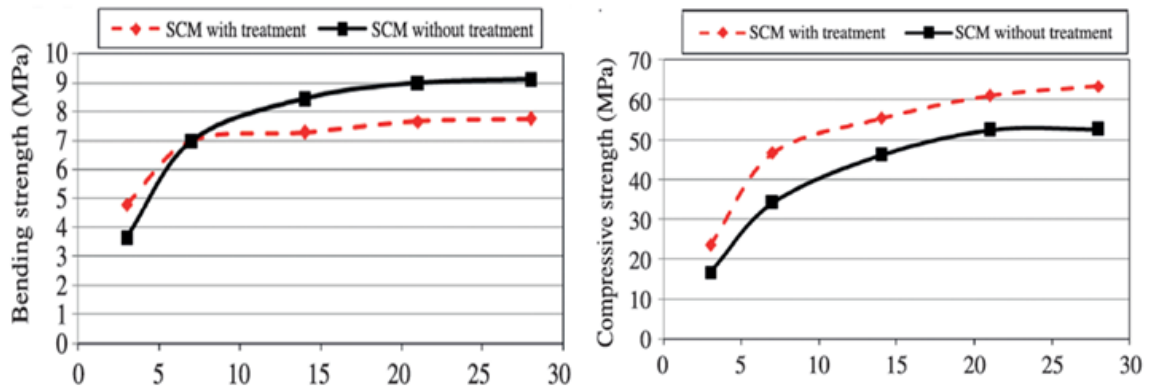


Figure 3.16: Effort de la flexion et de la compression des mortiers autoplaçants étudiés [97].

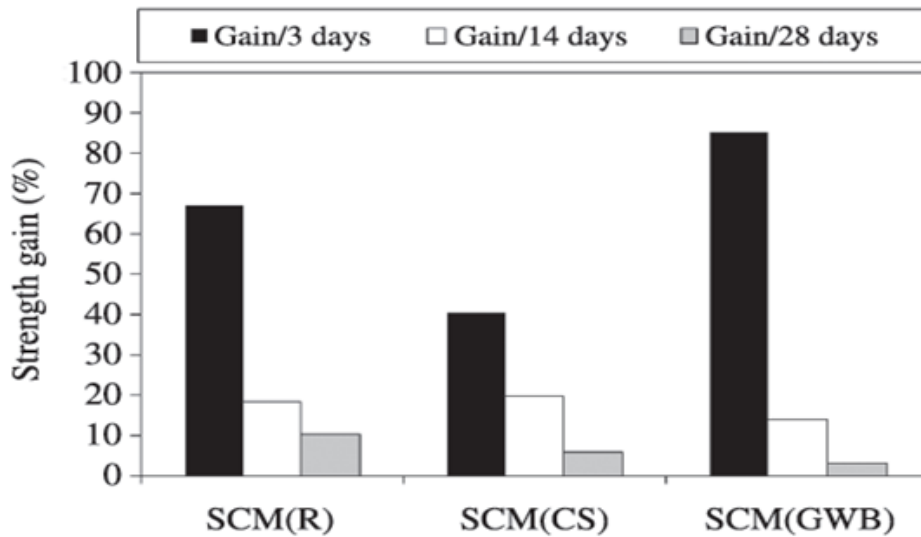


Figure 3.17: Gain d'endurance en compression des mortiers autoplaçants analysés. [97].

SCM : Mortier autoplaçant

(R) : échantillon de contrôle

(CS) : échantillon avec vase calciné

(GWB) : échantillon avec déchet de briques

Ces résultats soulignent la capacité à produire des bétons autoplaçants conformes aux normes requises, tant à la phase frais qu'à la phase durci. De plus, l'exploitation des sédiments de dragage et des déchets de briques comme additifs minéraux dans ce béton a démontré une amélioration notable de l'endurance à la compression ainsi qu'une l'endurance accrue à la perte de masse.

Le béton de granulats légers est une variante qui remplace le gravier grossier par des granulats plus légers, offrant diverses propriétés comme l'endurance sismique, l'endurance au feu, une légèreté remarquable, une robustesse mécanique et une durabilité accrue [98].

Dans le sud de Taïwan, plusieurs réservoirs d'eau ont subi des accumulations de sédiments, réduisant significativement leur capacité de stockage. Une étude de Wang H-Y [98] a cherché à exploiter ces sédiments de dragage, prélevés dans l'un de ces réservoirs, pour produire des granulats légers destinés à être employés dans la composition d'un BAP.

Les sédiments dragués ont été collectés, puis soumis à un processus de séchage, de tamisage et de transformation en granulats bruts, afin de les intégrer efficacement dans la formulation du béton autoplaçant (figure 3.45).

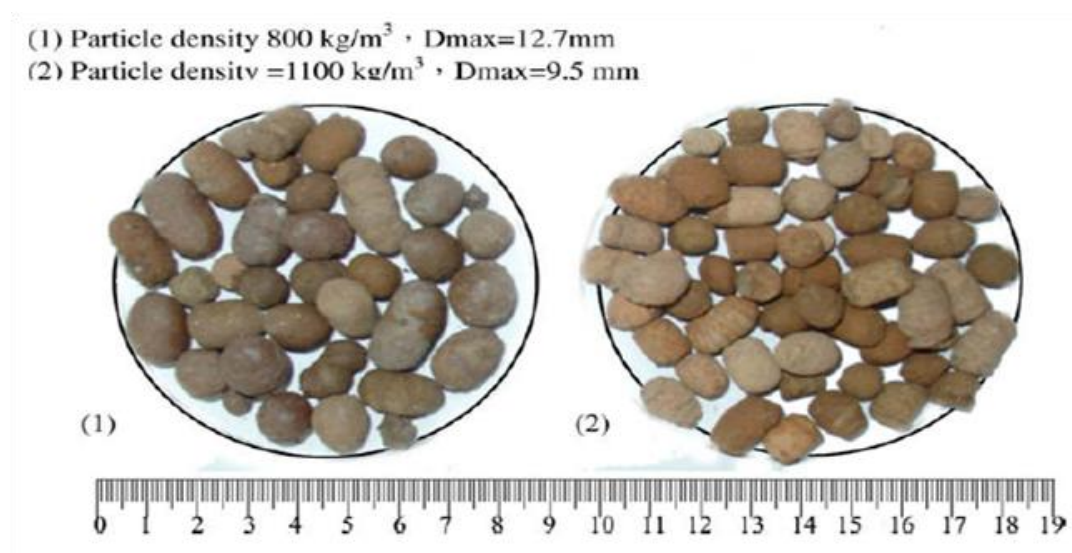


Figure 3.18: L'apparition de deux types d'agrégats légers liants avec des densités de particules différentes [98].

Les conclusions de l'étude menée par Wang [98] quant à l'utilisation des sédiments de dragage pour les granulats légers dans le béton autoplaçant sont très prometteuses :

- Le béton autoplaçant de granulats légers fraîchement coulé satisfait aux critères de fluidité élevée et de temps d'affaissement.
- Les bétons autoplaçants de granulats légers avec un faible rapport eau/liant démontrent une résistance à la compression accrue.
- La résistivité électrique des bétons autoplaçants de granulats légers dépasse les 20 K $\Omega$  cm à 28 jours, offrant une bonne résistance à l'érosion.
- Le SCLAC (self compacting lightweight aggregate concrete) ayant un faible rapport eau/liant présente une faible pénétration de chlorure, moins de fissures et une moindre perte de masse.

Belaribi O [1] a mené une série de travaux expérimentaux dans le cadre de sa thèse en génie civil. Son étude se concentrait concernant l'utilisation des dépôts de dragage provenant de deux digues distinctes (Fargoug et Chorfa) dans l'ouest algérien en tant qu'additif minéral, comparativement à la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (également dans l'ouest algérien). Le but était d'analyser l'habilité des vases calcinées à agir comme remplaçant proportionnel du ciment dans les mortiers et bétons autoplaçants. L'étude a porté sur les caractéristiques physiques, mécaniques et la durabilité à court, moyen et long terme de ces mélanges.

La recherche a été réalisée sur quatre types de bétons autoplaçants. Le premier est constitué de 20 % de pouzzolane naturelle provenant de Béni-Saf (BAP-PZ). Le deuxième et le troisième intègrent 20 % de vase calcinée dérivée des dépôts de dragage du barrage de Fergoug (BAP-VF) et de celui de Chorfa (BAP-VC). Enfin, un béton de référence a été inclus sans adjuvants pour permettre une comparaison.

Les résultats de l'étude sont les suivants:

- A l'état frais :

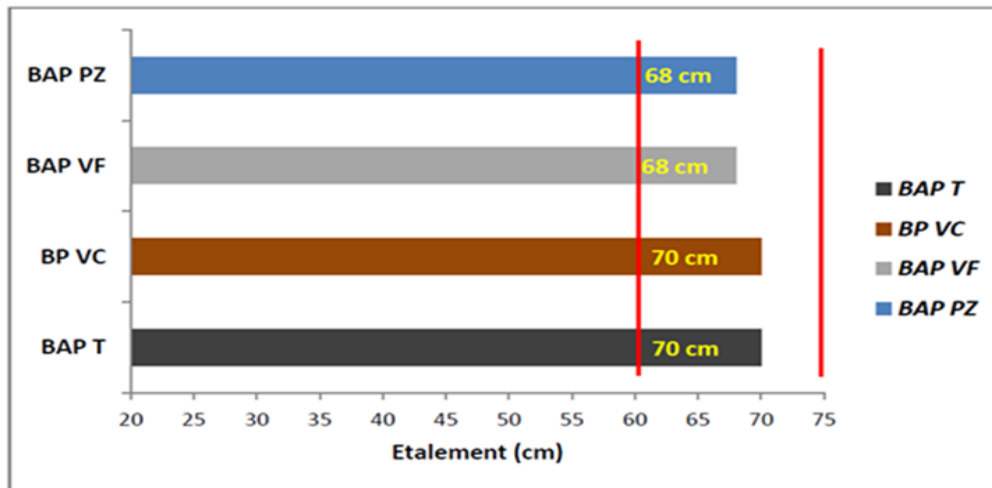


Figure 3.19: Valeurs d'étalements des quatre BAP étudiés [1].

Nous notons que toutes les valeurs sont au-dessus de la valeur minimale (60) et toutes les formulations du BAP Confirme aux exigences des normes requises.

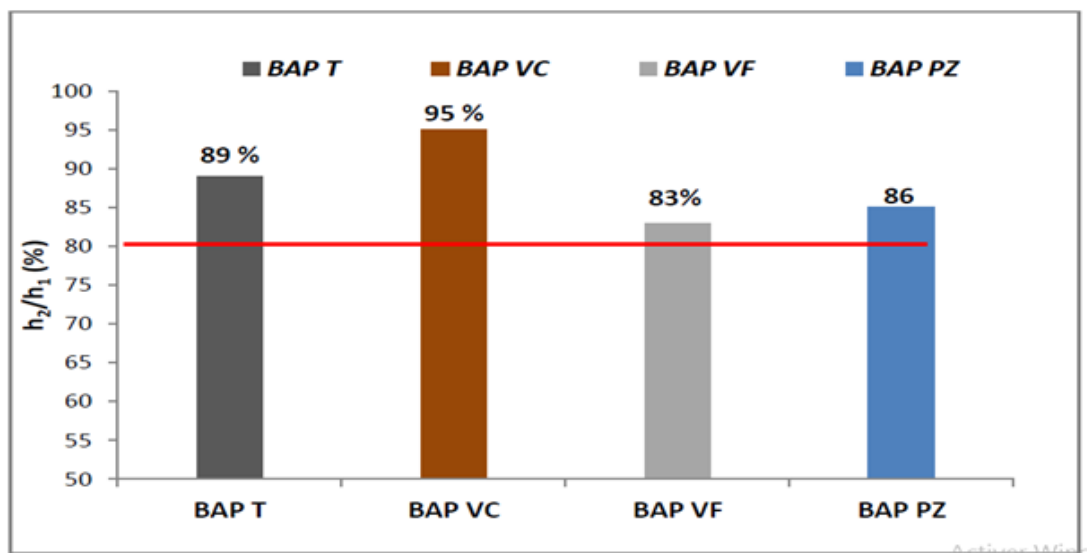


Figure 3.20: Les taux de remplissage des quatre BAP étudiés [1].

$h_1/h_2 > 0.8$  dans tous les BAP. Les BAP avec les dépôts de dragage révèlent un fort possibilité de remplissage dans la boîte en forme de L.

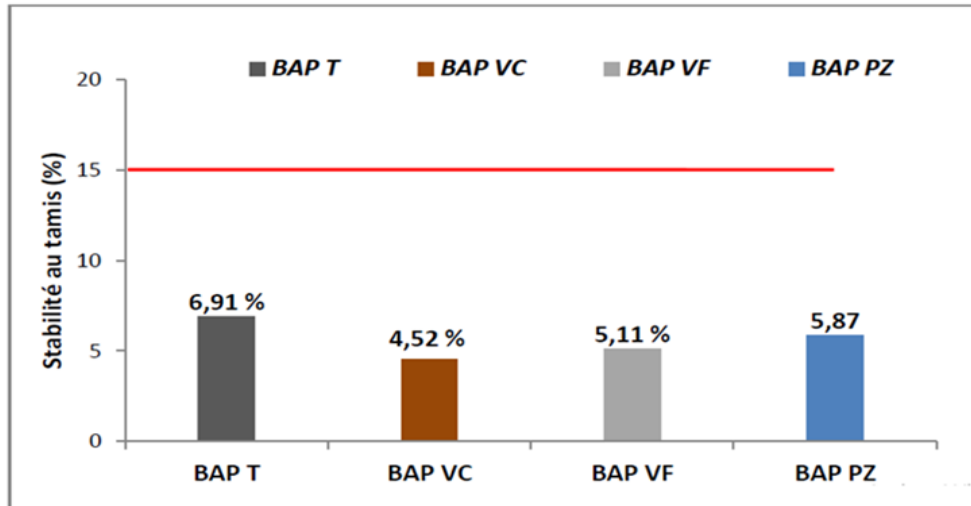


Figure 3.21: Taux de ségrégation des quatre BAP étudiés [1].

Le taux de ségrégation dans tous les BAP est inférieur à 14, et représente une grande résistance à la ségrégation du BAP.

- A l'état durci :

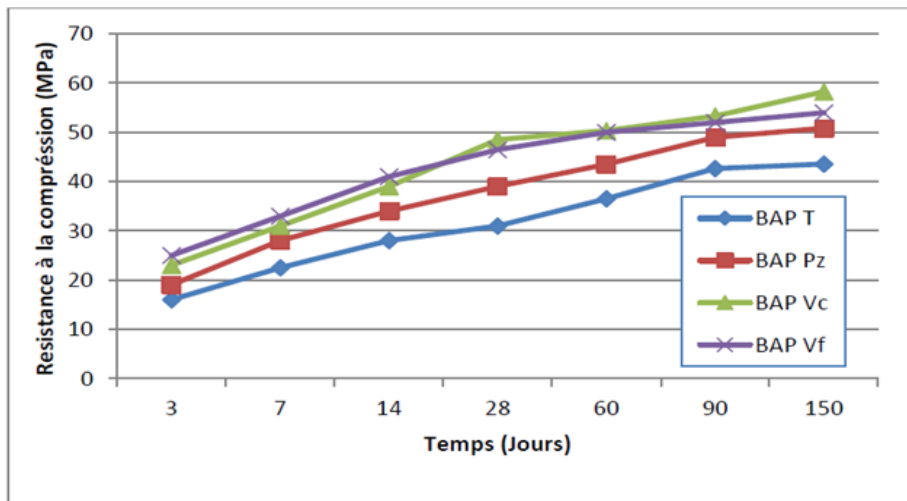


Figure 3.22: Résistances mécaniques à la compression des différents BAP étudiés [1].

La courbe indique une forte résistance à la compression pour tous les BAP, surtout à long terme. Les BAP avec des ajouts (BAP VC et BAP VF) présentent des gains de résistance respectifs d'environ 12,7 % et 5,8 % par rapport aux BAP PZ et témoin, à hauteur de 25 % et 19,35 %. Ces différences pourraient être attribuées à l'activité pouzzolanique, qui se développe lentement au début et prend de l'ampleur plus tardivement [1].

- La durabilité :

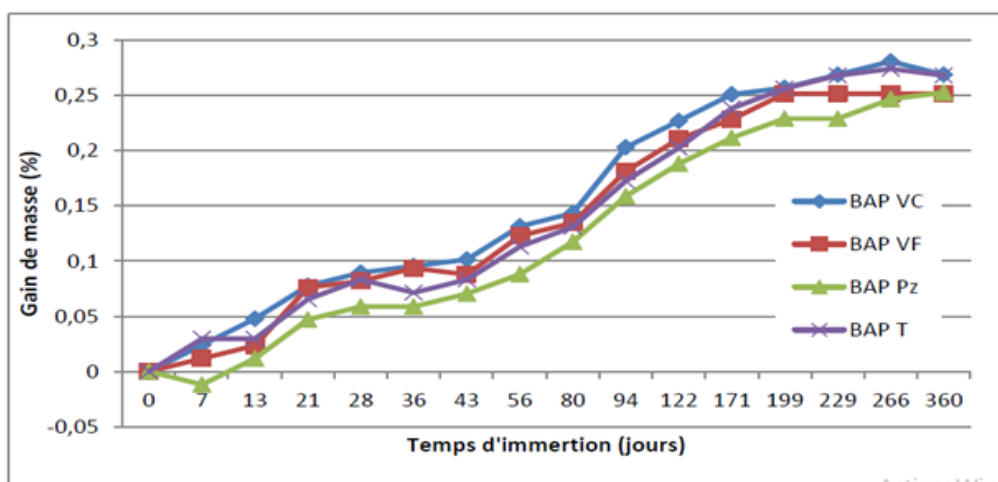


Figure 3.23: Variation de la masse des BAP étudiés immergés dans l'eau [1].

Dans cette courbe, on constate un effet positif du vase sur la conservation de la masse du BAP immergé dans l'eau douce.

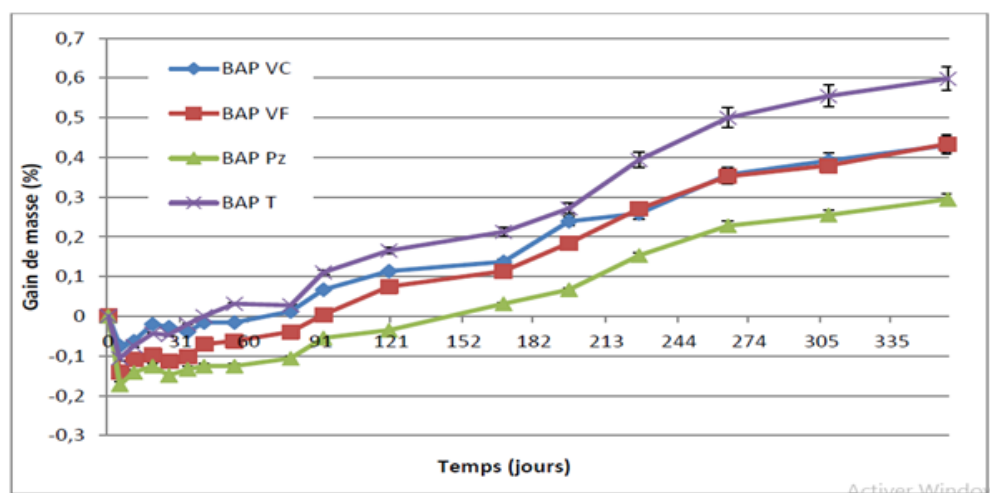


Figure 3.24: Fluctuation de la masse des BAP étudiés plongés dans la préparation de sulfate de sodium [1].

Il est remarquable que dans le temps, le gain de masse augmente dans toutes les formulations du BAP étudiées lorsqu'elles sont plongées dans la préparation de sulfate de sodium.

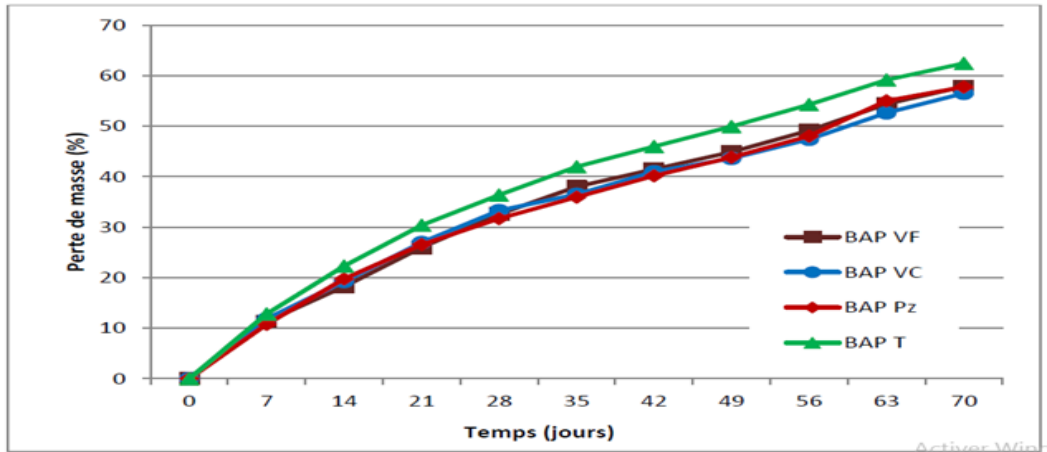


Figure 3.25: Diminution de la masse des BAP ayant 90 jours et plongés dans la préparation  $H_2SO_4$  [1].

Les échantillons présentent tous une élévation du pourcentage de diminution de la masse spécifique lorsqu'ils sont immergés dans une solution acide sulfurique, avec une légère prédominance pour les échantillons contenant des sédiments de dragage. Ces résultats [1] suggèrent qu'il est envisageable de substituer la pouzzolane naturelle par des dépôts de dragage dans la production de béton autoplaçant.

Les échantillons comportant des sédiments en tant qu'additif minéral dans le béton autoplaçant démontrent des caractéristiques supérieures, tant à la phase frais qu'à la phase durci, comparativement à ceux contenant de la pouzzolane. De plus, ils affichent une meilleure durabilité.

En somme, ces recherches et leurs résultats démontrent que les sédiments dragués peuvent être employés dans la composition du béton autoplaçant, respectant ainsi les normes internationales requises et fournissant les qualités indispensables. Cette valorisation confirme la viabilité d'exploiter les sédiments de dragage (vase) dans le domaine du BAP.

### 3.4 Conclusion

Le sable de dunes se présente en volumes énormes dans le désert et sans plans clairs pour l'exploiter, et il menace également les espaces verts avec le phénomène de désertification, et chaque année des tonnes de sédiments de dragage sont extraites des barrages, des rivières et même des ports. A un impact négatif sur la performance de ces ressources en eau, et si elles sont extraites, ils les constituent des déchets qui doivent être éliminés d'une manière ou d'une autre. En résumé, ces deux substances sont actuellement en Algérie comme des obstacles naturels et des problèmes qui doivent être résolus.

Dans ce chapitre, nous avons collecté quelques informations sur ces deux matériaux, et nous avons également essayé de rassembler un ensemble de travaux de recherche qui encouragent l'exploitation de ces deux substances dans le domaine de la l'architecture, notamment dans la formation de béton autoplaçant. Nous avons constaté que le sable de dunes peut être utilisé en quantité mesurée pour remplacer un pourcentage du sable ordinaire. Quant aux sédiments de dragage, nous avons constaté qu'il pourrait être exploité comme additif minéral dans ce béton. Les conclusions de ces études ont révélé que ces deux matériaux peuvent être exploités dans la formation de béton autoplaçant avec des caractéristiques rhéologiques et mécaniques satisfaisants et également de haute résistance et de bonne durabilité.

L'exploitation de ces deux matériaux dans le secteur de l'architecture ou autrement représente des solutions pour disposer de ces matériaux de manière bénéfique, et ces matériaux deviennent une ressource naturelle inépuisable qui peut être exploitée pour améliorer l'économie nationale. .

# Chapitre 4 : Etude expérimentale

---

## 4.1 Introduction

Il est connu en génie civil que lorsqu' on veut étudier un type de béton, il faut d'abord étudier ses composants et connaître leurs propriétés physiques et chimiques qui affectent les performances, la durabilité et la fiabilité du béton.

Dans cette section, nous exposons les différents matériaux exploités dans la formulation du béton autoplaçant que nous souhaitons étudier. Nous apprenons également ses différentes propriétés à travers des essais sur chacun des composants.

Dans cette section, nous avons également choisi l'approche d'élaboration du béton autoplaçant et des proportions de ses composants dans chaque formulation séparément et du programme de travail expérimental à suivre pour connaître l'effet de certains composants sur la performance et la durabilité de ce béton et cela se fait par des essais qui déterminent leurs propriétés dans leur état frais et durci. Nous avons également expliqué et exécuté le programme expérimental qui étudie l'aspect de durabilité dans les BAP.

## 4.2 Les matériaux utilisés

Dans cette étude, nous utilisons de nombreux matériaux qui font partie de la formulation du béton autoplaçant tels que le ciment, le sable (sable de carrière et sable de dunes), le gravier superplastifiant, l'eau ...etc.

### 4.2.1 Le Ciment

Le liant utilisé pour relier les différents composants du béton dans cette étude est le CEM II / 42.5R, un ciment portland doté d'une résistance mécanique à la compression de 42.5 MPa. Ce ciment est produit à l'usine de Hammam Dalaâ, située dans la région centrale algérienne de M'sila, et est Amplement exploité dans les travaux de construction de la wilaya d'Ouargla. Il se caractérise par une surface spécifique estimée à 3800 cm<sup>2</sup>/g et une densité d'environ 3.1 g/cm<sup>3</sup>. Le tableau 4.1 présente les pourcentages de ses composants chimiques.

Tableau 4.1: Formulation chimique du ciment employé.

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	Perte au feu
Teneur en %	15.85	3.74	3.68	61.48	1.28	2.51	0.52	0.1	0.028	10.2

#### 4.2.2 Les granulats

Nous avons employé trois sortes de granulats dans cette recherche: du sable de carrière, du sable de dunes et du gravier.

- Le sable de carrière (0/3) est un sable calcaire concassé dérivant de la société des matériaux de construction (SMCO) dans la province d'Ouargla, noté SC.
- Le sable de dunes est un sable siliceux provenant de la zone de Sidi Khouiled dans la wilaya d'Ouargla, située au sud de l'Algérie, noté SD



Figure 4.1: Sable de dunes utilisé.

- Gravier (3/8, 8/15) : C'est un roche calcaire concassé à deux fractions 3/8 et 8/15 provenant de la société des matériaux de construction (SMCO) dans la province d'Ouargla.

Le tableau 4.2 présente les pourcentages des différents composants chimiques des granulats utilisés.

Tableau 4.2: Compositions chimiques des granulats utilisé.

Constituants Chimiques (%)	Sable carrière SC et Gravier	Sable de dunes SD
Silice SiO <sub>2</sub>	9.12	91.23
Chaux CaO	56	2.04
Magnésie MgO	2.12	0.02
Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.69	0.76
Oxyde de fer Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.87	0.93
Sulfates SO <sub>3</sub>	0.85	0.17
Oxyde de sodium Na <sub>2</sub> O	-	0.15
Nature	Calcaire	Siliceux

Les caractéristiques physiques des granulats employés sont montrées dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3: Propriétés physiques des granulats utilisés.

Caractéristiques	Sable carrière SC 0/3	Sable de dunes SD --	Gravier	
			3/8	8/15
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	2.62	2.56	2.59	2.58
Equivalent de sable(%)	74.12	85	/	/
Module de finesse	2.84	0.8	/	/
Test d'abrasion de Los Angeles (%)	/	/	25	25
Absorption (%)	0.3	1.71	2.25	2.55

Dans la figure 4.2 on a montré les courbes de l'examen granulométrique des granulats utilisé :

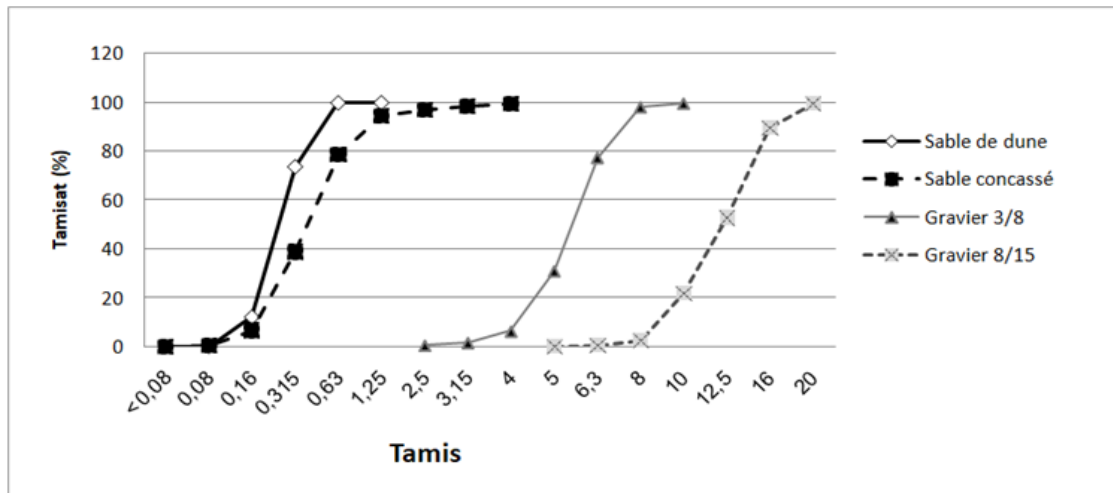


Figure 4.2: Résultats de l'examen granulométrique des granulats utilisés.

#### 4.2.3 Les additions minérales

Étant donné que la composition de béton autoplaçant doit contenir des quantités importantes d'additifs minéraux, nous avons utilisé deux types d'additifs minéraux dans cette recherche: filler calcaire et la Vase (sédiment de dragage).

- Filler calcaire: Il s'agit de pierres calcaires broyées, dérivées de carrières de l'entreprise nationale des granulats (ENG) - El khroub dans la province de Constantine il est commercialiser sous le nom de UF10.
- Vase (sédiment de dragage): extraits de la digue d'Aïn Dalia dans la province de Souk Ahras, Algérie.

La préparation de la vase draguée suit un processus en plusieurs étapes :

- Tout d'abord, l'échantillon de vase est soumis à un séchage initial dans une étuve chauffée à 105°C. Cette étape vise à éliminer toute humidité résiduelle, rendant ainsi la vase plus propice au broyage et au tamisage ultérieurs.
- Ensuite, la vase séchée est concassée pour la rendre plus facile à broyer par la suite.
- Une fois concassée, la vase est entièrement broyée pour obtenir une consistance souhaitée.
- Enfin, le matériau obtenu après broyage est tamisé Par le biais d'un crible de 80  $\mu\text{m}$  en utilisant la voie sèche. Seul le matériau qui passe à travers ce tamis est considéré pour la suite du processus.

Chaque étape vise à préparer la vase pour une utilisation spécifique, en éliminant l'humidité, en la rendant plus malléable pour le broyage, et en sélectionnant la granulométrie appropriée via le tamisage.

- Calcination: après le tamisage, les sédiments sont placés dans un creuset en alumine pour subir un traitement thermique dans un four statique. Un taux de chauffage de 10°C/min est appliqué, passant de la température ambiante aux températures isothermes désignées pour les expériences (de 100 à 800°C). Cette température est maintenue pendant 4 heures, puis elle est progressivement réduite jusqu'à atteindre la température ambiante.

Ce processus décrit une opération de calcination, où les sédiments sont soumis à des températures croissantes puis maintenus à des températures spécifiques pendant une durée déterminée. Cette technique permet de modifier la formulation chimique et les caractéristiques physiques des sédiments pour utiliser dans la formulation de BAP



Figure 4.3: La Vase extrait du barrage d'Aïn Dalia.



Figure 4.4: Étapes de préparation des sédiments de dragages (Vase).

La composition chimique des fillers calcaires et de vase est montrée dans le tableau 4.4:

Tableau 4.4: Composition chimique d'additions minérales utilisées.

Composant		SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF
Teneur (%)	Filler calcaire	0.04	56.03	0.02	0.03	0.17	0.02	0.02	0.05	0.008	43
	Vase	49.51	20.17	6.95	15.41	3.15	0.21	0.31	0.36	-	1.81

Les caractéristiques physiques des additions sont rassemblées dans le tableau 4.5:

Tableau 4.5: Caractéristiques physiques des additions minérales

Caractéristiques	Filler calcaire	Vase (sédiment de dragage)
Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.25	0.85
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.7	2.64
Surface spécifique ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3460	4950

L'examen granulométrique des deux additions minérales est illustré dans la figure 4.2

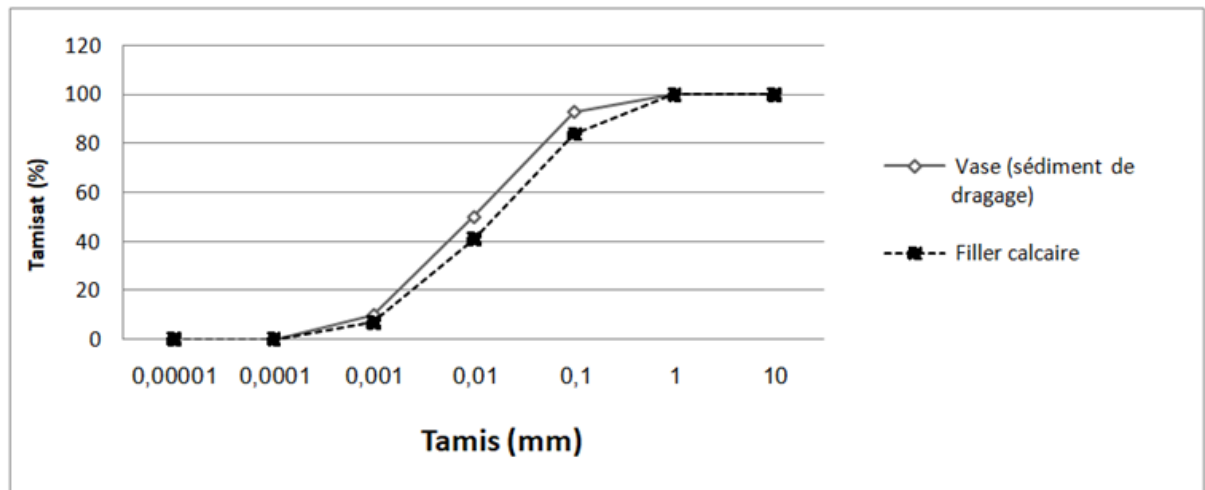


Figure 4.5: Distribution granulométrique des additions minérales.

#### 4.2.4 Les adjuvants

Le béton autoplaçant se démarque par ses propriétés rhéologiques singulières, offrant une fluidité remarquable et une viscosité lui permettant de se répartir uniformément dans les moules sans que ses particules ne se séparent. Ainsi, l'utilisation de divers plastifiants devient essentielle pour atteindre ces spécificités, tout en diminuant la Volume d'eau requise au mélange. Un excès d'eau risque non seulement la ségrégation, mais impacte également négativement l'endurance à la compression du béton durci.

Cette étude a fait usage d'un seul type d'adjuvant, le superplastifiant, connu sous le nom commercial Medaflow 30 de la société Granitex. Ce superplastifiant répond aux normes [NA 774, NA 5102 et NA 5075], et se distingue par ses caractéristiques clés

mentionnées dans le Tableau 4.6. Il agit en tant que réducteur d'eau hautement performant ou hyperfluidifiant, assurant ainsi Les caractéristiques nécessaires pour le BAP:

Tableau 4.6 : Caractéristiques d'adjuvant utilisé.

Caractéristiques	Medaflow 30
Aspect	Liquide
Couleur	brun clair
Densité	1.07 ± 0.01
PH	6 _ 6.5
Extrait sec	30 %
Teneur en ions Cl <sup>-</sup>	< 0.1g/l



Figure 4.6: Medaflow 30

#### 4.2.5 L'eau de gâchage

Pour éviter toute réaction chimique indésirable entre les composants de l'eau et d'autres particules présentes dans le béton, nous avons opté pour l'utilisation d'eau douce dans cette étude. Cette eau, couramment utilisée à des fins de consommation humaine, a été sélectionnée spécifiquement pour son absence de minéraux ou de composants susceptibles d'altérer les caractéristiques du béton. En choisissant de l'eau douce, nous visons à préserver l'intégrité des propriétés et des réactions prévues des matériaux utilisés dans la préparation du béton.

### 4.3 Travail expérimentale

Dans cette section, nous consignons les travaux expérimentaux entrepris sur le béton autoplaçant afin d'étudier l'impact des matériaux sélectionnés sur son état à la fois frais et durci. Ces expérimentations visaient à analyser l'impact des composants utilisés sur les caractéristiques du béton à différents stades de son processus, depuis sa formulation initiale jusqu'à son état final solidifié. Ces analyses permettront de mieux comprendre comment ces matériaux interagissent et influencent les propriétés essentielles du béton autoplaçant.

#### 4.3.1 L'approche d'élaboration du béton autoplaçant

Nous avons fait toutes les formulations de béton autoplaçant conformément aux conseils de l'association française du génie civil, AFGC [12], qui sont un ensemble d'instructions précisant les quantités de matériaux constitutifs et les méthodes utilisées dans le béton autoplaçant, On va travailler selon les éléments suivants :

- Dosage en ciment  $350 - 400\text{kg/m}^3$ , [26, 3, 80, 83].
- Le ratio gravier / sable (G/s) est proche de 1. Cela signifie que la quantité de sable et la quantité de gravier sont équivalentes, la quantité de sable et de gravier est  $850\text{ kg/m}^3$ . [80, 3, 83].
- Le ratio d'eau / ciment (E/C) est 0.5
- Le dosage du superplastifiant doit assurer la fluidité du mélange (entre 0,8 et 3 % de la masse de ciment), [12].
- Le dosage d'additions minérales est 25% de la masse de ciment ( $A/C= 0.25$ ), [80, 85, 87].

#### 4.3.2 Elaboration des BAP

Au cours de l'élaboration des échantillons de Béton Autoplaçant (BAP), nous amorçons le processus par la formulation d'un contrôle (témoin, BAP T), utilisant les composants les plus répandus dans ce type de béton à travers différentes régions du monde. Celui-ci comprend du ciment, du sable concassé, du gravier, des plastifiants, du filler calcaire, ainsi que le volume d'eau requis pour la préparation du béton.

Après la préparation du BAP témoin, nous procédons à la création du BAP SD en utilisant du sable de dunes. Nous conservons les mêmes composants que ceux du BAP témoin, tout en remplaçant une partie du sable de carrière par du sable de dunes selon les proportions suivantes:

BAP 25 SD: remplacer 25% de sable carrière par sable de dunes.

BAP 50 SD: remplacer 50% de sable carrière par sable de dunes.

BAP 75 SD: remplacer 75% de sable carrière par sable de dunes.

BAP 100 SD: remplacer 100% de sable carrière par sable de dunes.

Après avoir préparé le béton autoplaçant à base de sable de dunes selon les proportions précédentes et après avoir mené les expériences nécessaires sur chaque formulation. Nous choisissons le meilleur pourcentage pour compenser le sable de carrière avec du sable de dunes en se fondant sur les conclusions que nous avons tirées, et nous utilisons ce pourcentage (% optimale) dans la nouvelle formulation qui contient la Vase (BAP V). En se fondant sur les conclusions que nous avons tirées pour la phase frais et durci du BAP, le remplacement de 50% du sable concassé par du sable de dunes a démontré les performances les plus prometteuses. Par conséquent, nous avons adopté une élaboration constituée de sable concassé et 50% de sable de dunes pour poursuivre nos expérimentations où nous commençons par remplacer le filler calcaire progressivement par le vase et selon les proportions suivantes:

BAP 25 V: remplacer 25% de filler calcaire par la Vase.

BAP 50 V: remplacer 50% de filler calcaire par la Vase.

BAP 75 V: remplacer 75% de filler calcaire par la Vase.

BAP 100 V: remplacer 100% de filler calcaire par la Vase.

Nous avons affinons ainsi notre programme expérimental pour ce béton (BAP V), nous permettant d'étudier en détail les propriétés rhéologiques et mécaniques de cette composition. Cette démarche nous offre également l'opportunité d'évaluer l'impact conjoint des deux matériaux, la vase et le sable de dunes, sur les performances du béton autoplaçant.

Dans le tableau 4.7, Les quantités des divers matériaux employés dans les différentes formulations des BAP étudiées dans un  $1 \text{ m}^3$  de BAP est indiquée comme suit :

Tableau 4.7: Proportions et compositions des BAP préparés.

		BAP T	BAP SD				BAP V			
			25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Proportions										
E/C		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
G/S		1	1	1	1	1	1	1	1	1
A/C (%)		25	25	25	25	25	25	25	25	25
Sp/C (%)		1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Quantités										
Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )		400	400	400	400	400	400	400	400	400
Sable carrière (Kg/m <sup>3</sup> )		850	637.5	425	212.5	0	425	425	425	425
Sable de dunes (Kg/m <sup>3</sup> )		0	212.5	425	637.5	850	425	425	425	425
Filler calcaire (Kg/m <sup>3</sup> )		100	100	100	100	100	75	50	25	0
Vase (Kg/m <sup>3</sup> )		0	0	0	0	0	25	50	75	100
Gravier (Kg/m <sup>3</sup> )	3/8	425	425	425	425	425	425	425	425	425
	8/16	425	425	425	425	425	425	425	425	425
Superplastifiant (Kg/m <sup>3</sup> )		4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
Eau (Kg/m <sup>3</sup> )		200	200	200	200	200	200	200	200	200

#### 4.3.2.1 Les étapes de malaxage

Avant de commencer le processus de malaxage, les quantités nécessaires de chaque composant (sable, gravier, eau...) doivent être préparées pour préparer l'échantillon de béton [3].

- Déterminez le poids des ingrédients secs, ajoutez-les au mixeur et pré-humidifiez-les avec 10 % de l'eau de gâchage.
- Pour rendre le mélange sec homogène, le mélangeur a été fait fonctionner pendant 30 secondes.
- - Ajouter le Sp dilué dans 50% de l'eau de gâchage après les 30 premières secondes de gâchage, puis poursuivre le mélange pendant une minute et demie.
- Ajoutez progressivement le reste de l'eau et continuez à mélanger pendant deux minutes.
- Afin de laisser reposer le mélange, le mixeur est arrêté pendant deux minutes [99].
- Continuez ensuite à mélanger pendant encore deux minutes.
- Enfin, le mélangeur est arrêté et les essais sur l'état frais commencent.

#### 4.3.3 Essais effectués sur les formulations de BAP préparées

Des essais recommandés ont été menés pour caractériser les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP à la phase fraîche et durci.

##### 4.3.3.1 Essais concernant l'état frais.

Le béton autoplaçant se distingue des autres types de béton par ses propriétés rhéologiques uniques. Afin de tester ces caractéristiques, l'AFGC [12] a identifié un ensemble d'essais, parmi lesquels les plus importants sont :

- Des essais visant à mesurer la capacité d'écoulement.
- Des essais pour évaluer la capacité de remplissage.
- Des essais pour évaluer la résistance à la ségrégation.

Dans cette étude, nous utilisons trois types d'expériences pour évaluer les propriétés rhéologiques des formulations de béton étudiées:

- Test d'étalement au cône.
- L'utilisation de la boîte en L.

- L'évaluation de la stabilité au tamis.

➤ **Étalement au cône d'Abrams (slump flow)**

A été étudié en détail dans le premier chapitre. Ce test vise à évaluer l'habileté des échantillons de BAP à s'étaler sans être soumis à des forces extérieures. L'expérience a été réalisée sur le groupe des éprouvettes de BAP préparés pour confronter les résultats obtenus. La qualification d'un béton comme autoplaçant repose sur un diamètre moyen d'étalement compris entre 60 et 75 cm, le test a été effectué conformément à la réglementation européenne NF EN 12350-8 [100].

$$60 \text{ cm} < \frac{(d_1 + d_2)}{2} < 75 \text{ cm} \quad (4.1)$$

Les détails de l'essai et la façon de mesurer les diamètres sont illustrés dans la Figure 4.7.



Figure 4.7: Essai d'étalement au cône d'Abrams.

➤ **Boîte en L (L box)**

Cette expérience, déjà abordée dans le premier chapitre pour en détailler le principe, consiste en l'essai de la boîte en forme de lettre L. Son but est de simuler le procédé de mise en place du béton dans des formes réels sur le chantier, vérifiant sa capacité à bien se positionner dans le coffrage et à passer entre les barres d'armature, tout en assurant l'absence de blocages indésirables qui pourraient compromettre sa mise en place. L'horizontalité précise de la boîte est cruciale pour assurer l'exactitude des mesures effectuées. Dans cette teste, les deux hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  sont mesurées et la proportion entre elles devant être supérieure à 0,8 pour qualifier le béton comme

autoplaçant, l'essai a été effectué conformément à la réglementation NF EN 12350-10 [101].

$$\frac{H_2}{H_1} > 0.8 \quad (4.2)$$

La figure suivante présente l'équipement utilisé pour cette évaluation.



Figure 4.8: Essai de la boîte en L.

➤ **Stabilité au tamis (Stability in sieve)**

Ce test a pour but d'évaluer la résistance du béton à la séparation, phénomène où les composants ont tendance à se séparer pendant le coulage en raison de leurs poids et formes. Pour être considéré autoplaçant, le béton doit résister à ce phénomène, évalué par cet essai. La stabilité du béton face à la ségrégation est évaluée par la proportion du poids traversant un crible de 5 mm comparé au poids total de l'échantillon. Une ségrégation inférieure à 15% ( $S < 15\%$ ) est considérée comme stable, le test effectué selon NF EN 12350-11 standard [102]. Les étapes de ce test comprennent :

- Prélèvement 10 litres de béton immédiatement suite au malaxage.
- Couverture du seau pour préserver le béton de la déshydratation, puis attente pendant 15 minutes.
- Tarage du base et du crible à vide.
- Après 15 minutes, on observe une possible présence d'eau claire de ruissellement à la partie supérieure du récipient.

- Versement sur le crible de 5 mm d'un masse de béton équivalent à ( $M_{éch} = 4,8 \pm 0,2$ ) kg.
- Déversement de ce béton au centre du crible depuis une hauteur de chute de ( $50 \pm 5$ ) cm, suivi de la notation du poids de l'échantillon.
- Ensuite, on procède à la pesée de la laitance qui a traversant le crible après 2 minutes noté  $M_L$ .

$$0\% < S = \frac{M_L}{M_{éch}} \times 100 < 15\% \quad (4.3)$$



Figure 4.9: Essai de stabilité au tamis.

#### 4.3.3.2 Tests concernant l'état durci

À l'état durci, le BAP ne se varie pas beaucoup du béton ordinaire, nous serons donc satisfaits des expériences menées sur du le béton ordinaire.

##### ➤ Résistance à la compression

Cette étude inclut une catégorie de test sur le BAP à son phase durci : le test de résistance à la compression selon les normes NF EN 12390-3 [103]. Après le processus de mélange du béton, les éprouvettes ont été versées dans des formes cubiques en fer de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  et ont été laissés à durcir pendant 24 heures. Ensuite, les moules ont été retirés et les échantillons ont été placés dans un bassin d'eau à une température contrôlée de  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , où ils sont restés complètement immergés jusqu'à la date des tests respectifs aux jours 7, 14, 28 et 90. L'estimation de

la résistance à la compression a été menée à l'aide d'une machine de compression hydraulique, comme illustré dans la Figure 4.10.



Figure 4.10: Essai de la résistance à la compression.

#### ➤ Résistance à la traction par flexion

Dans cet essai, nous préparons des éprouvettes de béton autoplaçant d'un volume de  $(7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3)$ , en raison des défis liés à la réalisation de cette expérience et du manque de matériel nécessaire. Nous utilisons la méthode de traction par flexion à avec l'assistance d'une machine. L'éprouvette est placée en position horizontale pour simuler l'application d'une force de traction sur ses deux extrémités. Cette approche donne la possibilité d'évaluer la force maximale de traction qui conduit à la rupture de l'éprouvette. Cet essai est en accord avec la norme NF EN 12390-5 [104] et est réalisé à des âges de 7, 14, 21, 28 et 90 jours pour les échantillons de la première partie contenant différents pourcentages de sable des dunes, et à 28 jours pour les échantillons contenant différents pourcentages de sédiments de dragage (Vase).

Dans le contexte d'une flexion à quatre (4) points:

$$\sigma_{flex} = \frac{fl}{d_1 d_2^2} \quad (4.4)$$

Dans le contexte d'une flexion trois points:

$$\sigma_{flex} = \frac{3}{2} \frac{fl}{d_1 d_2^2} \quad (4.5)$$

Avec  $F$  en N et  $d_1$  et  $d_2$  en mm,  $\sigma_{flex}$  est exprimé en MPa. Lors de ce test, la rupture survient avec un gradient de contraintes. Un coefficient de 0,6 est conseillé pour obtenir la résistance en traction pure [105].

$$\sigma_{trc} = 0.6\sigma_{flex} \quad (4.6)$$

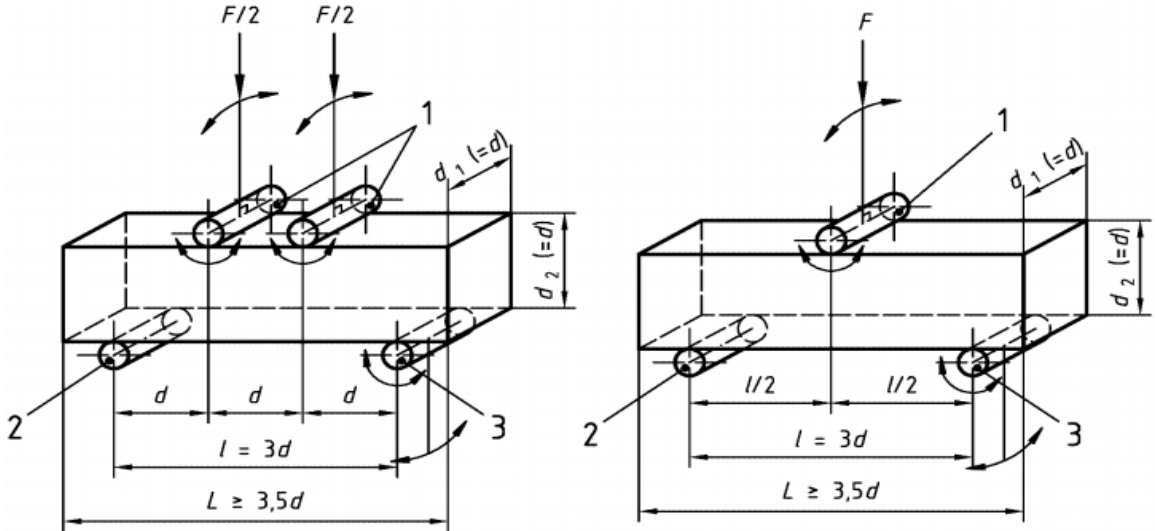


Figure 4.11: Un schéma illustratif d'un test de flexion selon trois et quatre points [105].

Dans le contexte de cette recherche, nous avons effectué une expérience de flexion en trois points, les échantillons utilisés et la méthodologie expérimentale expliqués dans la Figure 4.12.



Figure 4.12: Essai de traction par flexion.

### 4.3.3.3 Essais de durabilité

C'est une série d'expérimentations réalisées sur des échantillons de béton à l'état durci. Dans le cadre de cette étude, des essais de durabilité ont été conduits sur trois types d'échantillons : le BAP T, le BAP 50 SD et le BAP 50 V. Ces tests englobent des évaluations concernant les attaques acides et les sulfates, la pénétration de chlorures ainsi que l'absorption capillaire.

#### 1- Solution acide ( $H_2SO_4$ )

Cette expérience suit la norme ASTM C267 - 01 [106], nous utilisons une solution acide ( $H_2SO_4$ ) pour évaluer l'effet des acides sur les formulations préparées de BAP. Pour créer la solution acide ( $pH < 7$ ), nous utilisons de l'eau distillée avec une concentration d'acide de 5%. L'expérience se déroule à une température ambiante de 23 °C.

Nous pesons des éprouvettes cylindriques âgés de 28 jours, avec un diamètre de 6,3 cm et une hauteur de 12,6 cm. avant leur immersion dans la solution afin d'obtenir leur masse initiale  $M_0$ . Ces éprouvettes sont ensuite immergés dans la solution pendant une tempe de 56 jours, avec un renouvellement de la solution tous les 30 jours pour maintenir le niveau d'acidité [107].

Chaque semaine, des échantillons sont retirés de la solution, lavés trois fois à l'eau claire, puis laissés sécher pendant 30 minutes. Par la suite, nous enregistrons leur poids après quoi ce processus se poursuit sur une période de 8 semaines.

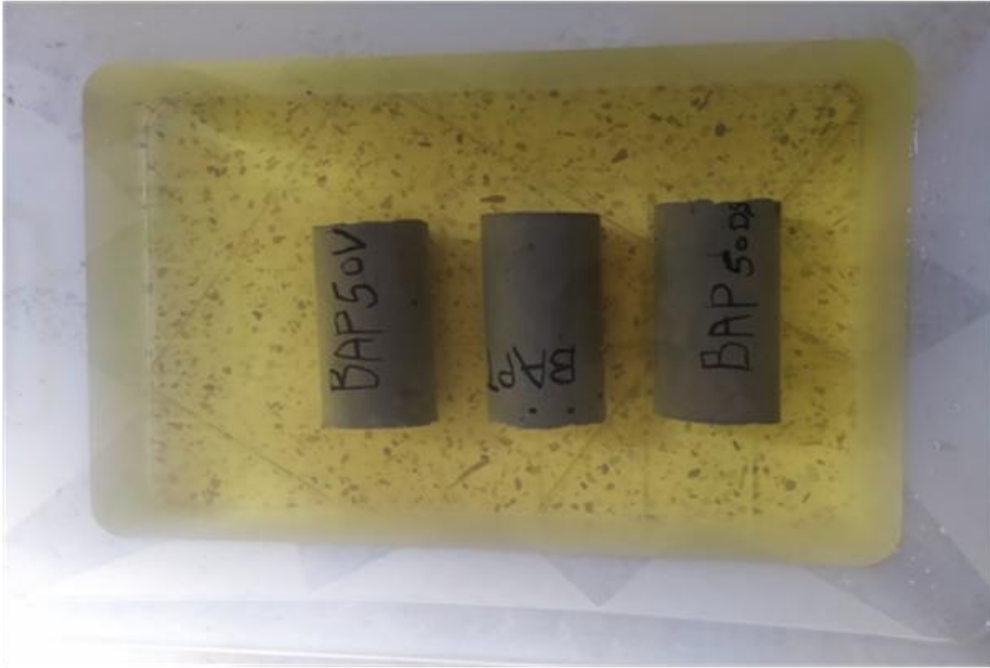


Figure 4.13: Les éprouvettes immergées dans la solution acide ( $H_2SO_4$ ).

➤ **Variations de la masse :**

En accord avec à la méthode ASTM C267-01 (2012) [106] pour évaluer les changements de masse (dégradation), nous mesurons le poids de départ du spécimen avant submersion dans la solution, que nous désignons par  $M_0$ . À chaque semaine d'immersion, nous retirons l'éprouvette de la solution, la lavons à l'eau trois fois, laissons sécher pendant 30 minutes, puis procédons à sa pesée avant de la replonger dans la solution ( $M_i$ ).

$$VM\% = \left[ \frac{M_0 - M_i}{M_0} \right] \times 100 \quad (4.7)$$

VM : Changement du poids en (%) ;

$M_0$  : Le poids de l'échantillon avant la soumission à l'agression acide en grammes;

$M_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 8$ ) : le poids suite à 1, 2, ..., 8 semaines d'agression en (gramme).

➤ **Résistance à la compression**

Nous évaluons l'effet des solutions sur la résistance à la compression des échantillons. En les retirant de la solution, en les essuyant avec un morceau de tissu, puis en les laissant sécher pendant deux heures dans des paramètres habituels de laboratoire avant d'entreprendre à l'essai de compression. Cette procédure est répétée à des intervalles de 30, 60 et 90 jours après l'immersion.

**2- Solution de sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )**

Dans cette expérience, nous nous concentrons sur l'étude de l'impact des attaques externes de matériaux soufrés sur le béton autoplaçant. Pour cela, nous immergeons complètement des échantillons préalablement préparés ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) dans une préparation de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), préparée sur la base d'études bibliographiques [108], à l'âge de 28 jours.

La solution utilisée contient 5 % de sulfite de sodium par rapport au volume d'eau distillée. Cette expérimentation s'étend sur une durée de 200 jours, et la solution est changée tous les 30 jours en vue de renouvellement [108]. Les résultats de cette expérience sont évalués en observant les variations de masse et en mesurant la résistance mécanique à la compression des échantillons de béton autoplaçant étudiés.



Figure 4.14: Les éprouvettes immergées dans la solution sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

➤ **Variations du poids:**

Le changement de poids des éprouvettes submergées dans une préparation de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) est étudié pour évaluer l'impact de cette substance soufrée sur la diminution de poids du BAP. Cette méthode est similaire à celle utilisée pour l'essai avec la solution acide.

Chaque 30 jour pendant la période d'essai, nous mesurons la masse des échantillons. Après les avoir retirés de la solution, nous les essuyons avec un chiffon sec et les laissons reposer pendant 30 minutes dans des conditions normales de laboratoire [1].

Ensuite, nous pesons l'éprouvette et enregistrons son poids avant de la replonger dans la solution.

#### ➤ **Résistance à la compression**

Dans ce test, nous appliquons les mêmes conditions expérimentales utilisées pour la solution acide et mesurons la résistance à 60, 90, 120, 150 et 200 jours.

### **3- Pénétration rapide du chlorure**

Dans le test de pénétration des ions de chlorure dans le béton, une seule solution aqueuse contenant du chlore est utilisée. En général, on recourt à des solutions telles que le chlorure de sodium (NaCl) ou l'acide chlorhydrique (HCl), entre autres, pour simuler la présence de chlore que le béton pourrait rencontrer dans son environnement. Cette solution est préparée à une concentration spécifique.

Pendant le test, des échantillons de béton sont immergés dans la solution contenant le chlore. Lorsque le béton est exposé à cette solution, les particules de chlore commencent à migrer à travers la structure du béton en raison des différences de concentration, ce qui constitue le phénomène de migration ionique. Le but de ce essai est d'évaluer la volume de chlore qui traverse le béton sur une période définie, en utilisant une méthode de mesure électrique.

Lorsque les ions chlorure passent des particules de la solution vers le béton, ils se déplacent à travers la structure du béton en raison de leur charge électrique et réagissent avec les composants du matériau. Cette migration entraîne des changements de concentration à l'intérieur du béton, ce qui peut altérer la structure ionique des matériaux présents dans le béton.

L'évaluation de l'endurance à l'intrusion des ions chlorure s'est appuyée sur la norme ASTM C1202 [109] et a été réalisée sur des spécimens extraits parmi les mélanges. Cette analyse requiert l'utilisation d'échantillons cylindriques mesurant 95 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur. Dans cette étude, une solution de chlorure de sodium (NaCl) a été utilisée sur les échantillons examinés à l'âge de 28 et 60 jours et pendant 6 heures pour chaque échantillon de béton autoplaçant, nous avons choisi

cette solution car les sols désertiques sont généralement riches en sels de ce type (NaCl). Le test est montré à la Figure 4.15.

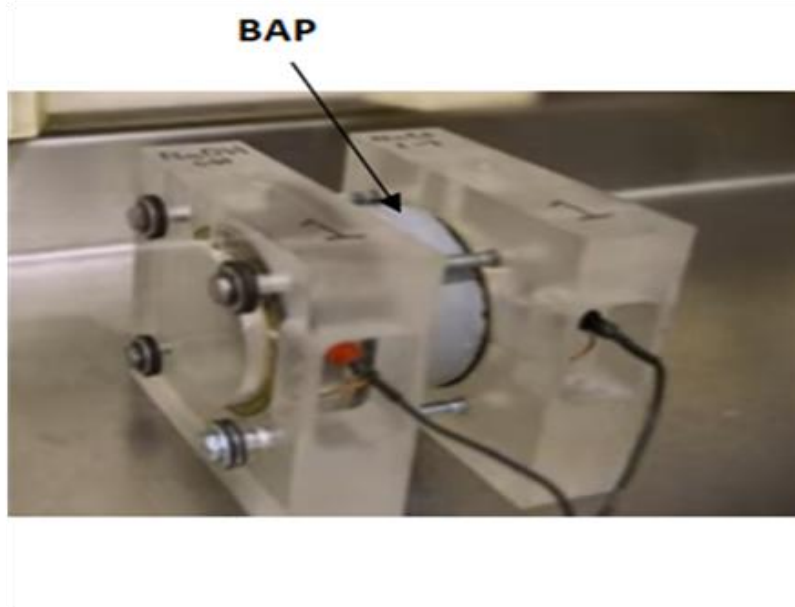


Figure 4.15 : Test de pénétration rapide du chlorure sur les BAP étudiés.

#### 4- Absorption capillaire

Les substances agressives telles que les acides et les sulfates pénètrent dans le béton et interagissent avec ses composants et causent de grands dommages à sa structure. Ces substances agressives dépendent du pourcentage de vides dans le béton.

Plus il y a de vides, plus il est facile pour les substances agressives de pénétrer le béton et lui causent des problèmes. Ces vides sont appelés pores. La porosité du béton est généralement mesurée par une expérience d'absorption capillaire, où l'échantillon de béton est immergé dans un récipient d'eau et laissé pendant un certain temps, puis on calcule la différence en sa masse sèche avant immersion et sa masse saturée en eau après immersion, et on obtient ainsi le pourcentage de porosité dans cet échantillon.

Le volume des éprouvettes utilisés est inspirée des règles de la norme NBN B 15-215 : 1989 où le volume de l'échantillon ne doit pas être inférieur à  $800 \text{ cm}^3$  et être inférieur à  $1200 \text{ cm}^3$ . on utilise dans notre cas des éprouvettes prismatiques de volume ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ cm}^3$ ).

Se qui donne :  $800 \text{ cm}^3 < 1000 \text{ cm}^3 < 1200 \text{ cm}^3$

Les étapes de l'expérience sont inspirées de l'Expérience de Baudouin M A [14], qui passe par les étapes suivantes :

- Faire sécher les spécimens de 28 jours dans un four à 80°C jusqu'à obtenir un poids constant, de manière à ce que  $\Delta m/\text{jour} \leq 0,1 \%$ , afin d'assurer un séchage total des spécimens.
- Procéder à l'imperméabilisation en utilisant un polymère sur les deux bords latéraux en interaction avec l'eau, tout en conservant la face inférieure qui sera examinée (Figure 4.16).
- Permettre à la résine de durcir pendant 24 heures dans un environnement à température et humidité réglées.
- Évaluer le poids à sec ( $M_{\text{sec}}$ ) et immerger les surfaces à analyser dans un réservoir d'eau d'une épaisseur de 10 mm.
- Évaluer le poids ( $M_{\text{humide}}$ ) de l'échantillon au bout de 24 heures.
- Établir le coefficient d'absorption capillaire, qui se détermine par l'équation suivante [110] :

$$C_a = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{sèche}}}{S} \quad (4.8)$$

$C_a$  : coefficient d'absorption capillaire ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ ),

$M_{\text{humide}}$  : Poids de l'échantillon à une date limite spécifiée (kg),

$M_{\text{sèche}}$  : est le poids initial de l'échantillon (kg),

$S$  : Est la section de l'échantillon ( $\text{m}^2$ ).

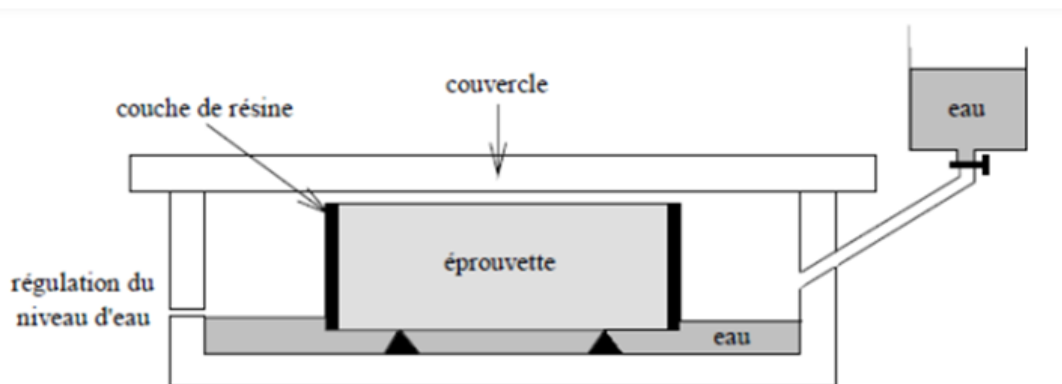


Figure 4.16: Géométrie de l'essai d'absorption capillaire [110].



Figure 4.17: Test d'absorption capillaire.

Le travail expérimental pourrait être synthétisé à travers le diagramme exposé dans la Figure 4.18.

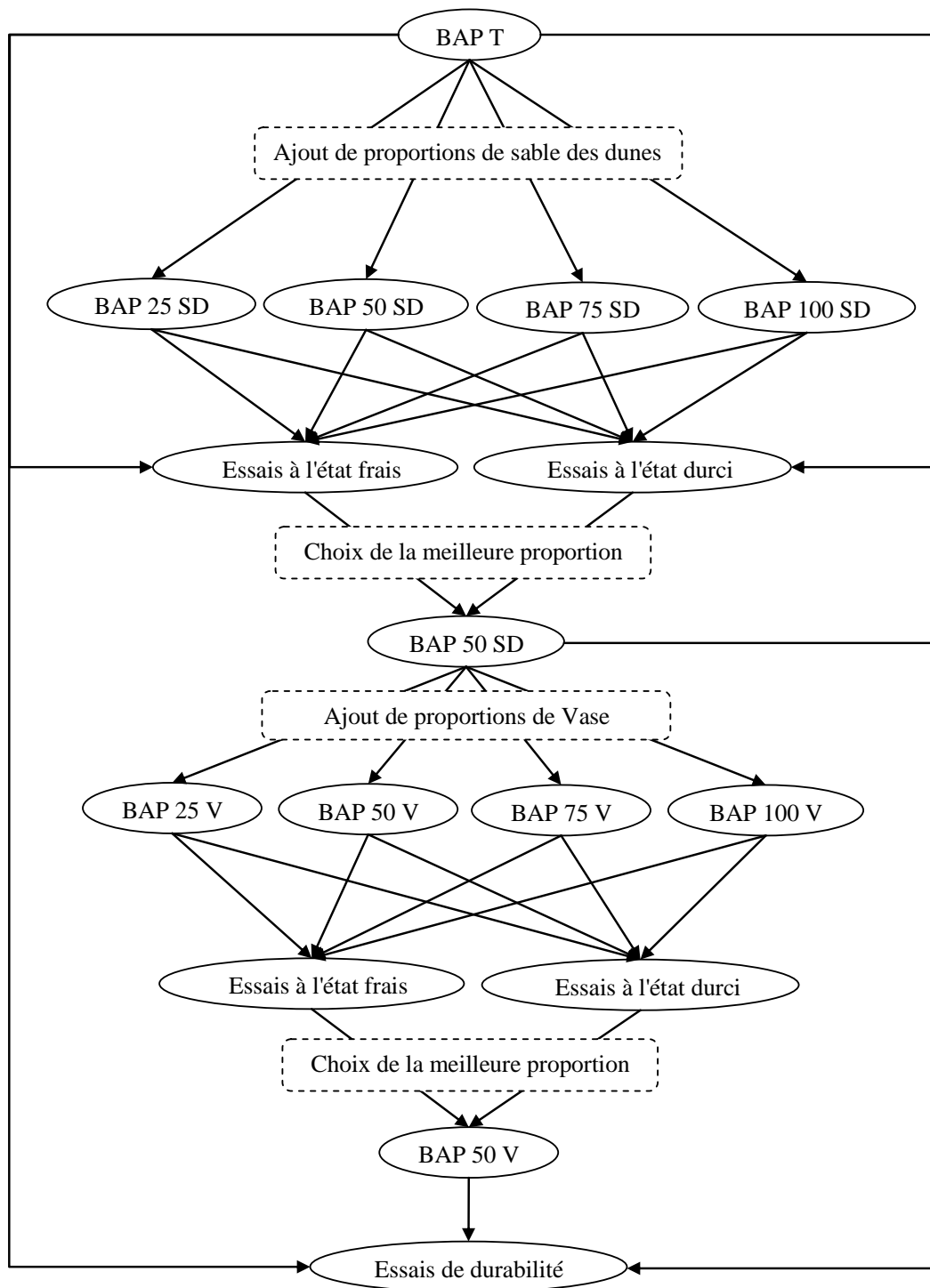


Figure 4.18: Schéma du Processus Expérimental

#### 4.4 Conclusion

L'aspect pratique de cette l'investigation se focalise sur l'analyse de l'effet du substitut du sable concassé par du sable de dunes et du filler calcaire par des sédiments de dragage concernant les caractéristiques du BAP.

Ce chapitre revêt une importance capitale, car il présente une exploration exhaustive des matériaux employés dans la recherche et de leurs propriétés. Cela a été rendu possible grâce à une série d'expériences minutieuses menées sur ces composants. Nous avons exposé la méthode employée pour élaborer les mélanges de béton pertinents, tout en détaillant les différents essais pratiques réalisés sur les différentes formulations de BAP. Ces essais ont permis d'obtenir des résultats cruciaux pour étudier le rôle et l'effet du sable de dunes et de vase du barrage sur les propriétés du Béton autoplaçant. Cette étude a été réalisée en compensant de manière régulière (partielle et totale) le sable carrière et le filler calcaire par ces deux derniers matériaux (sable de dunes et vase).

Le but de cette approche était d'apprécier l'influence de ces substitutions sur les propriétés du béton autoplaçant, offrant ainsi une perspective approfondie de l'impact spécifique de ces éléments sur la durabilité du BAP.

# Chapitre 5: Étude des résultats et interprétation

---

## 5.1 Introduction

Cette section vise à examiner et discuter en détail les conclusions tirées à partir des expériences menées dans le contexte de cette recherche. Ces résultats sont le fruit d'une série de tests rigoureux et d'analyses visant à évaluer les effets de différentes substitutions (sable de dunes, vase) dans les compositions de béton autoplaçant (BAP).

La section des résultats commence par présenter de manière détaillée les données empiriques acquises lors des tests, notamment les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du BAP soumis à diverses proportions de sable de dunes et de sédiments de dragage (vase). Ces conséquences sont affichées sous forme de tableaux, de graphiques et d'analyses quantitatives.

La discussion qui suit l'analyse des résultats met l'accent sur l'interprétation approfondie de ces données, mettant en lumière les tendances, les corrélations et les implications pratiques des observations faites. Cette section explore également les implications des résultats pour les caractéristiques désirées du BAP, en mettant en évidence les avantages, les défis et les recommandations découlant de ces constatations.

Le but fondamental de ce chapitre est de fournir un entendement complet des conséquences des substitutions sur les propriétés du BAP, tout en offrant une discussion éclairée sur l'impact pratique de ces résultats dans le secteur de bâtiment et de l'ingénierie des matériaux..

## 5.2 L'influence du Sable des dunes sur les caractéristiques du béton autoplaçant (BAP)

Durant la première partie de l'étude expérimentale, des substitutions de sable concassé par du sable de dunes ont été effectuées à des proportions variées dans plusieurs formulations de béton autoplaçant, puis des essais ont été réalisés à la phase frais et durci sur ces compositions afin d'étudier leur impact sur les propriétés

rhéologiques et mécanique du BAP. L'objectif était de déterminer la meilleure proportion de substitution du sable concassé par du sable de dunes dans ces formulations.

### 5.2.1 L'impact du sable de dunes sur les caractéristiques Frais du BAP

À l'état frais, trois propriétés du béton autoplaçant sont examinées : la capacité de propagation, le remplissage (ou écoulement) et la résistance à la ségrégation. Ces propriétés sont évaluées à l'aide de tests spécifiques : l'étalement au cône, la boîte en L et la stabilité au tamis, respectivement. Les résultats de l'état frais peuvent être résumés dans le Tableau 5.1

Tableau 5.1: Résultats des essais en état frais du béton autoplaçant étudié.

Formulation	Etalement (cm)	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)
BAP T	72.0	0.87	7.2
BAP 25 SD	71.5	0.89	6.9
BAP 50 DS	71.4	0.90	6.2
BAP 75 DS	70.2	0.75	5.7
BAP 100 DS	65.0	0.66	4.1

#### ➤ Etalement au cône d'Abrams

À partir du Tableau 5.1, nous constatons que les résultats du taux d'étalement pour tous les mélanges autoplaçants contenant des proportions de sable de dunes se situent dans la plage requise pour le béton autoplaçant, devant être comprise entre 60 cm et 75 cm, conformément aux suggestions de la règle NF EN 12350-8 [100].

Ces données numériques permettent de déduire l'impact du sable de dunes sur la propriété de l'étalement, montré dans la Figure 5.1

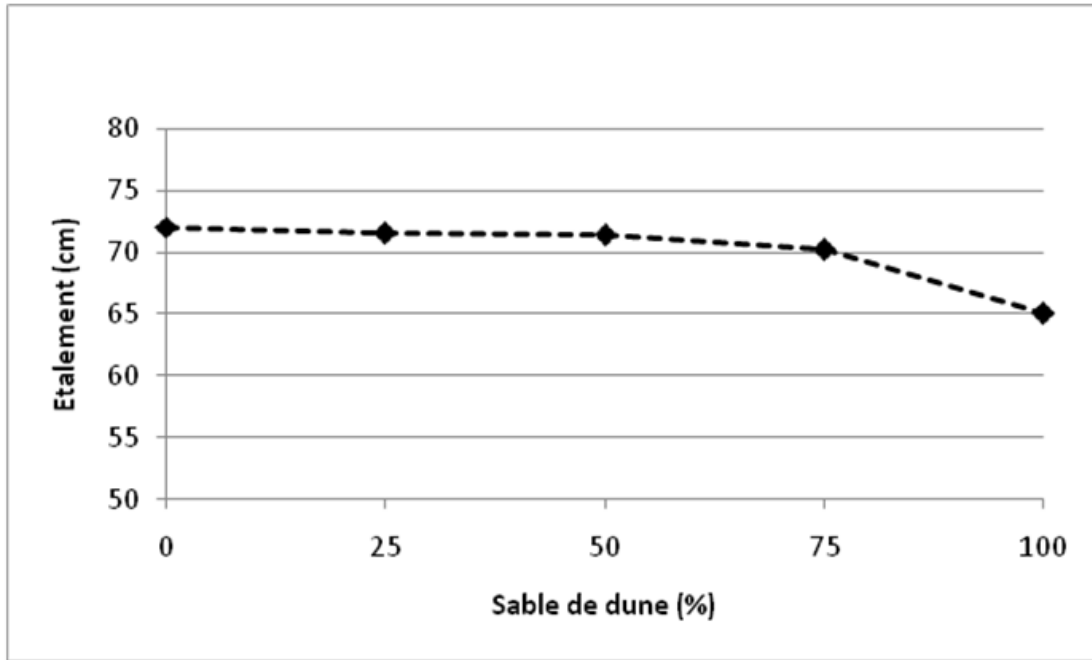


Figure 5.1: L'impact du sable de dunes sur les valeurs d'étalement des mélanges de béton autoplaçant étudiés.

À travers la courbe, nous remarquons que les chiffres d'étalement diminuent à mesure que la quantité de sable de dunes ajoutée augmente. Cette réduction est principalement causée par l'accroissement des particules fines dans le sable de dunes, qui ont une capacité accrue à absorber l'eau. Par conséquent, un accroissement de l'absorption d'eau entraîne une diminution de la capacité de propagation du béton. Il est toutefois essentiel de noter que cet effet, comme il est illustré dans les graphiques, était relativement minime, le taux de propagation restant dans une fourchette acceptable, en particulier pour des ratios de sable de dunes de 25 %, 50 % et 75 %.

#### ➤ Boîte en L

D'après les données du Tableau 5.1, on constate que les valeurs du test de la boîte en L pour les mélanges BAP T, BAP 25 SD et BAP 50 SD étaient supérieures à 0,8, ce qui se situe dans la plage requise pour le béton autoplaçant. En ce qui concerne les mélanges BAP 75 SD et BAP 100 SD, des valeurs inférieures à 0,8 ont été enregistrées, indiquant qu'elles ne respectent pas les critères définis pour ce type de béton [101].

L'effet du sable des dunes sur les caractéristiques de passage et de remplissage peut être montré plus explicite sur la Figure 5.2.

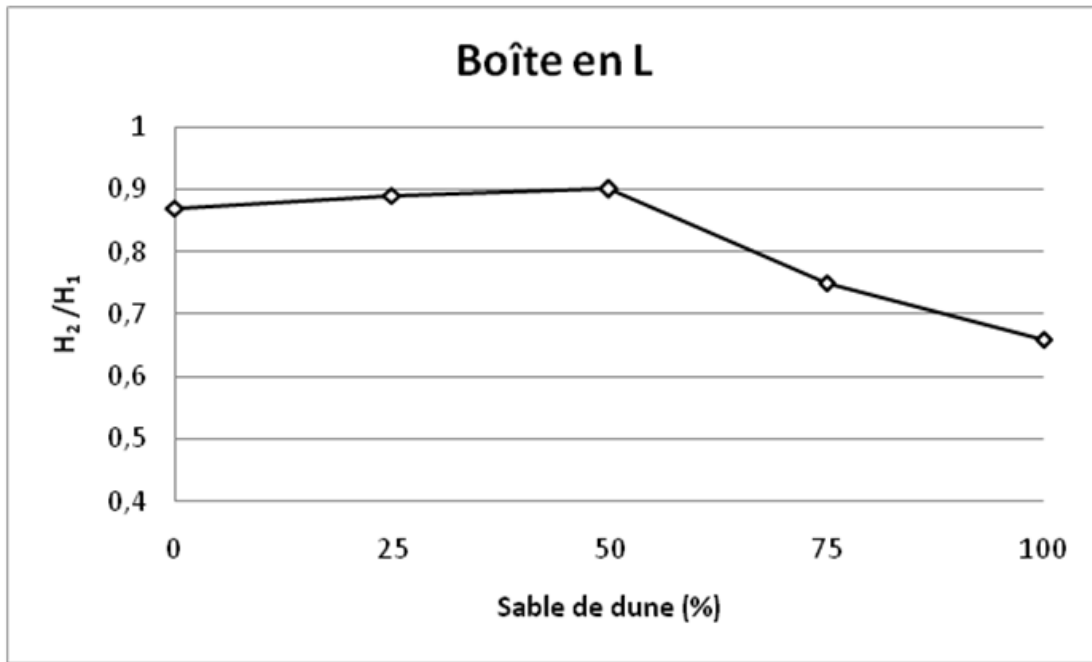


Figure 5.2: L'influence du sable de dunes sur les propriétés de remplissage et de passage dans le test de la boîte en L.

L'aptitude à traverser du béton autoplaçant entre les barres de la boîte en L ainsi que la capacité de remplissage dans la partie horizontale de la boîte augmentent avec l'élévation de la proportion de sable de dunes ajouté à la composition du béton, notamment aux proportions de 25% et 50%. Cependant, cet impact positif disparaît et devient négatif lors du remplacement de proportions élevées de sable concassé par du sable de dunes, notamment à 75% et 100%. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation du pourcentage de particules fines présentes dans le sable de dunes dans le mélange de béton, réduisant ainsi le frottement des particules plus grosses, telles que le gravier et le sable concassé. Cela entraîne leur flottaison dans le mélange de ciment, d'eau, de filler calcaires et de sable de dunes, augmentant ainsi la mobilité du mélange [111]. En revanche, avec des proportions élevées, les particules fines absorbent plus d'eau, augmentant la viscosité et réduisant la mobilité, tout en observant une adhérence du béton sur les côtés internes de la boîte en L.

➤ **Stabilité au tamis**

Le Tableau 5.1 indique que tous les données de l'essai de stabilité au tamis pour les mélanges étudiés se situent dans la plage requise pour le béton autoplaçant, limitée entre 3 % et 15 % [102].

Les résultats de l'expérience ainsi que les effets du sable de dunes sur la propriété de résistance à la ségrégation des mélanges autoplaçants investigués peuvent être représentés dans la figure 5.3.

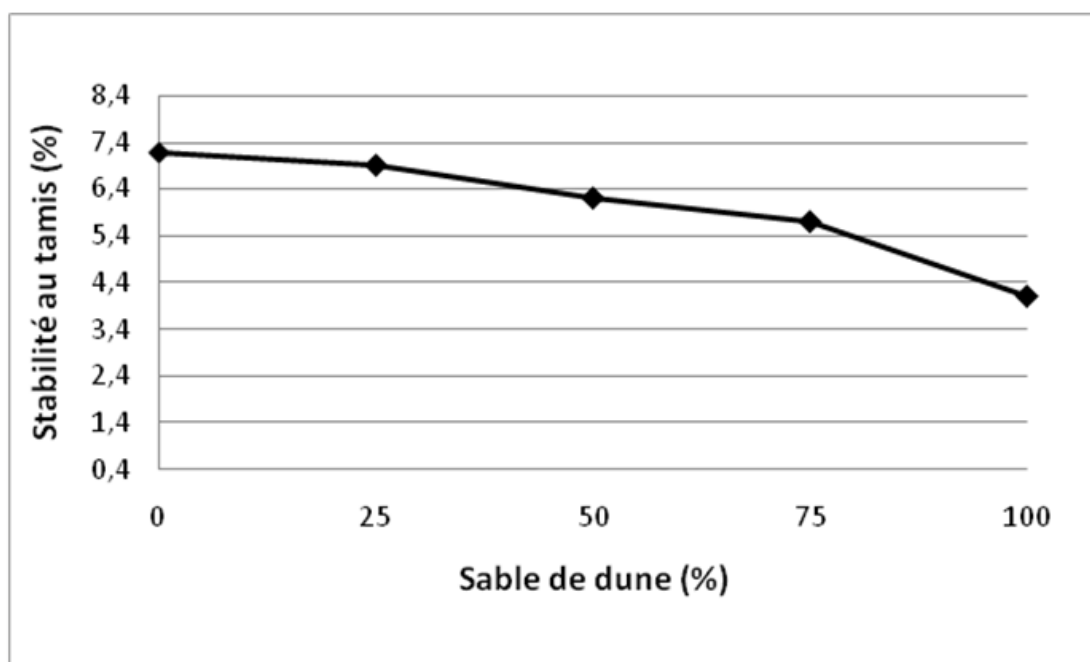


Figure 5.3: L'influence du sable de dunes sur la résistance à la ségrégation.

Concernant le test de stabilité au tamis, tous les échantillons ont montré une stabilité sans aucun signe visible de séparation. Les pourcentages enregistrés étaient conformes aux directives recommandées, avec des valeurs inférieures à 15 % et supérieures à 3 %, conformément à la norme européenne NF EN 12350-11 [102]. Ces valeurs démontrent l'efficacité de l'incorporation de sable de dunes dans la composition du BAP pour améliorer sa résistance à la ségrégation, comme l'a également indiqué l'étude présentée par Douara et Guettala [111].

### 5.2.2 L'effet du sable de dunes sur les caractéristiques durcies du BAP

Dans l'état durci, deux essais importants ont été réalisés sur les échantillons de béton étudiés à différents stades de durcissement. Ces essais sont la résistance à la compression et la résistance à la traction, visant à évaluer la capacité de résistance des échantillons à ces contraintes.

#### ➤ Résistance à la compression

Le test de résistance à la compression est une étape cruciale pour estimer la résistance et robustesse du béton. Dans ce contexte, un essai de résistance à la compression a été effectué sur des échantillons cubiques de béton, chaque échantillon ayant des dimensions de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ . Trois échantillons ont été utilisés pour obtenir une valeur moyenne de la résistance à la compression, contribuant ainsi à réduire les dangers d'inexactitudes et pour parvenir à des résultats plus exacts. Cette expérience fournit une compréhension approfondie de comment les matériaux se comportent dans des conditions de charge spécifiques et détermine leur capacité à résister aux forces externes.

Les effets de l'incorporation de sable de dunes dans la composition du béton autoplaçant sont plus clairement visibles à travers la figure 5.4.

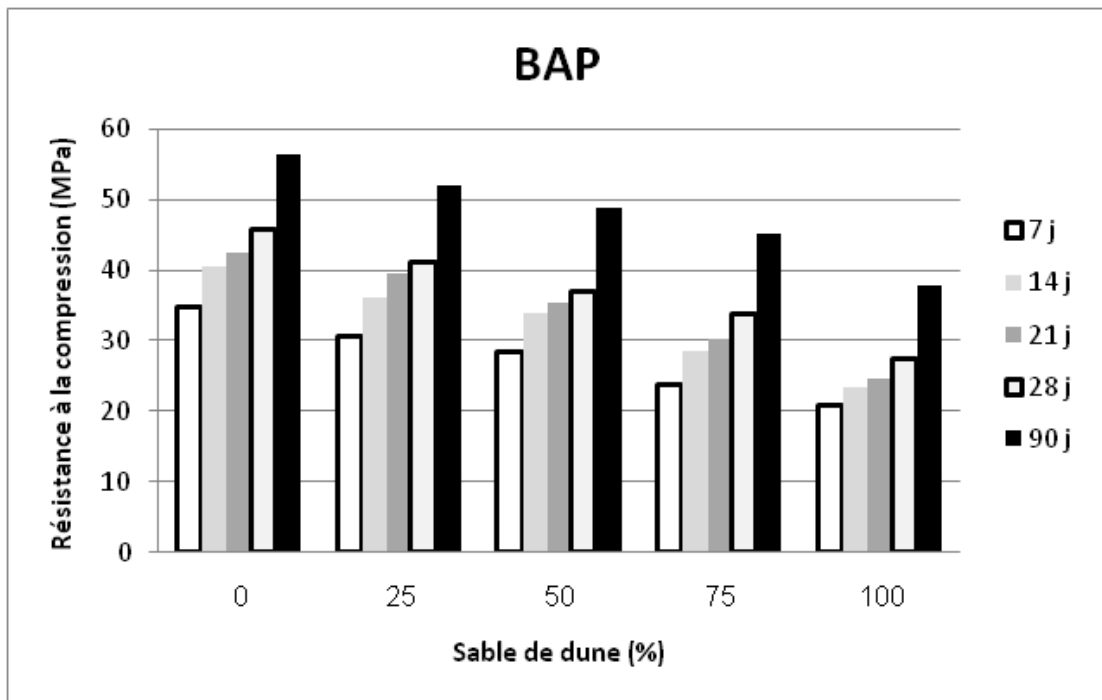


Figure 5.4: L'influence du sable de dunes sur la résistance à la compression du BAP.

D'après les données du Tableau 5.2 et de la Figure 5.4, une réduction notable de la résistance à la compression est observée avec chaque accroissement du pourcentage de sable de dunes ajouté au mélange de béton. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Douara et Guettala [111], et cela peut être attribué à l'abondance de particules fines dans le sable de dunes, ce qui nécessite plus de ciment pour la liaison, tant entre elles qu'avec d'autres particules dans le mélange [82]. De plus, la forme arrondie et vitrifiée des grains de sable de dunes limite la capacité du béton à atteindre une cohésion substantielle à l'état durci [112], ce qui a un impact négatif sur la résistance à la compression. Néanmoins, malgré ces effets observés, la résistance à la compression reste dans une plage acceptable lorsque le sable de dunes est incorporé à des proportions de 25%, 50% et 75%.

➤ **Résistance à la traction**

La résistance à la traction est une propriété principale du béton qui mesure sa capacité à résister aux forces de traction. Dans cette étude, des échantillons prismatiques de dimensions  $7 \times 7 \times 28$  cm<sup>3</sup> ont été utilisés pour évaluer cette propriété. Ces échantillons spécifiques ont été choisis pour leur représentativité dans la mesure de la résistance à la traction du béton. La résistance à la traction est cruciale dans diverses applications de construction, car elle indique la capacité du matériau à résister aux contraintes qui tendent à le tirer ou le séparer. Les résultats de ces tests fourniront des informations précieuses sur la performance du béton autoplaçant à base de sable de dunes en termes de résistance à la traction.

Les effets du sable de dunes sur la propriété de résistance à la traction du béton autoplaçant consolidé sont clairement présentés dans la Figure 5.5.

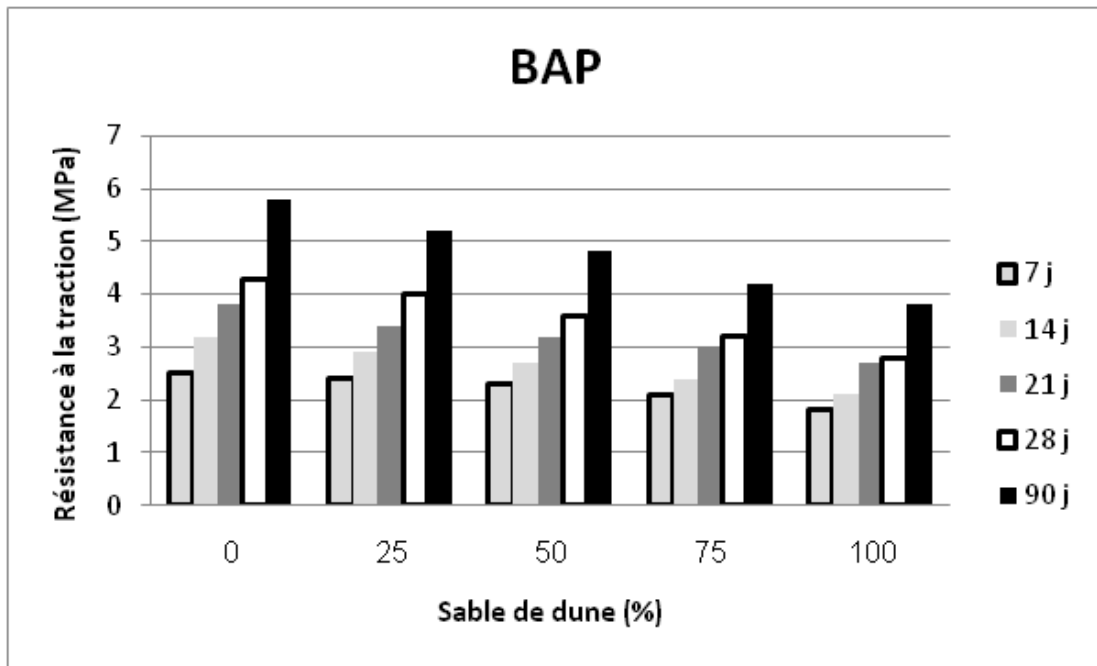


Figure 5.5: L'influence du sable de dunes sur la résistance à la traction du BAP.

Les résultats montrent que l'ajout de sable de dunes à la formulation du béton autoplaçant entraîne une réduction de la résistance à la traction. Cela est attribuable à la concentration élevée de particules fines qui demande une plus grande quantité de ciment pour obtenir une meilleure cohésion et une résistance accrue [82].

La première partie de l'expérimentation se concentre sur l'étude des effets de remplacer le sable concassé par du sable de dunes sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant (BAP), dans le but de déterminer la meilleure proportion de substitution. Les résultats globaux des expériences ont prouvé qu'il est possible de recourir à des proportions significatives de sable de dunes dans la formulation du BAP, mais il est crucial de déterminer la meilleure proportion de substitution pour une utilisation optimale. Ces résultats orientent vers la nécessité d'identifier la proportion optimale de substitution pour le sable de dunes, en vue de son utilisation dans la deuxième partie de l'expérimentation. Cette deuxième partie consiste à étudier les effets de la substitution des granulats calcaires par les sédiments de dragage (vase) sur les mêmes propriétés du BAP et sur sa durabilité. En se basant sur ces résultats, l'équipe de recherche a identifié un taux de substitution de **50 %** comme étant la meilleure proportion pour remplacer le sable concassé par du sable de dunes dans la composition du BAP.

### 5.3 L'effet du sédiment de dragage (Vase) sur les caractéristiques du béton autoplaçant (BAP)

Dans la seconde partie du travail expérimental, l'effet du remplacement du filler calcaire par des sédiments de dragage (Vase) en tant qu'additifs minéraux dans la formulation du BAP a été examiné pour ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Après avoir déterminé le meilleur pourcentage de sable de dunes dans le béton autoplaçant dans la première phase, fixé à 50 %, cinq formulations de béton autoplaçant ont été élaborées, toutes composées de 50 % de sable concassé et 50 % de sable de dunes. Elles se différencient les unes des autres par le pourcentage de sédiments de dragage, variant de 0 à 100 %, afin de mieux saisir l'effet de ces derniers sur les caractéristiques de ce béton à l'état frais et durci.

#### 5.3.1 L'effet de Vase sur les caractéristiques frais du BAP à base de sable de dunes

Les résultats des essais sur l'état frais du BAP étudié, notamment les essais d'étalement au cône, le test d'écoulement dans la boîte en L, et le test de stabilité au tamis, sont illustré dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.2: Résultats des essais d'état frais pour les formulations autoplaçant étudiée.

Formulation	Etalement (cm)	Boîte en L	Stabilité au tamis (%)
BAP 0 V	71.4	0.90	6.2
BAP 25 V	71.0	0.85	5.4
BAP 50 V	70.6	0.83	5.1
BAP 75 V	70.2	0.81	4.77
BAP 100 V	69.5	0.79	3.91

#### ➤ Etalement au cône d'Abrams

À partir du Tableau 5.3, il est observé que les résultats du taux d'étalement pour tous les mélanges autoplaçants contenant des proportions de sédiment de dragage

(Vase) se situent dans la plage requise pour le béton autoplaçant, laquelle doit être comprise entre 60 cm et 75 cm, selon les directives de la norme NF EN 12350-8 [100]. Ces valeurs numériques permettent de déduire l'impact du Vase sur la propriété de l'étalement, tel qu'est présenté dans la Figure 5.6.

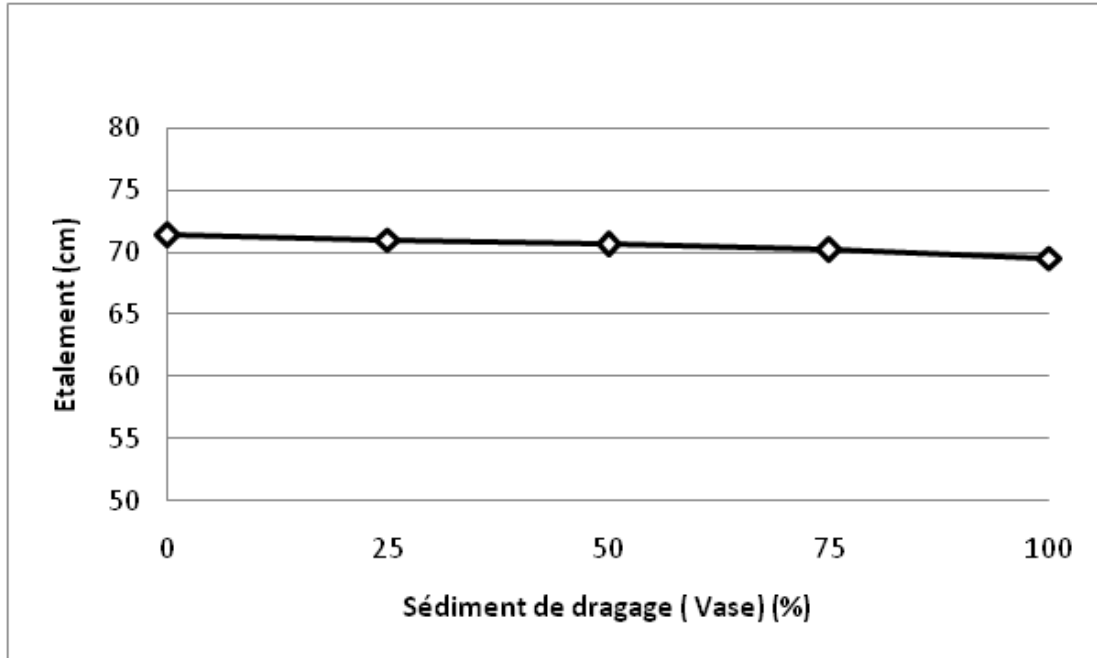


Figure 5.6: L'impact du Sédiment de dragage (Vase) sur les valeurs d'étalement des mélanges de béton autoplaçant étudiés.

À travers la courbe de données, on peut observer l'effet d'incorporation des sédiments de dragage (Vase) sur la propriété de l'étalement du béton autoplaçant. On constate une réduction de l'étalement avec l'augmentation de la quantité de Vase ajoutée. Cependant, cette diminution est très légère et n'affecte pas de manière significative cette propriété. Toutes les formulations qui contiennent des proportions variables de cette substance présentent un bon étalement, restant dans les limites acceptables pour le béton autoplaçant [100]. Cette légère diminution peut s'expliquer par la croissance des quantités de fines dans le mélange, ce qui demande une quantité accrue d'eau de gâchage ou de superplastifiant pour préserver sa maniabilité.

#### ➤ Boîte en L

Selon les données du Tableau 5.3, les résultats du test de la boîte en L pour les mélanges BAP 0 V, BAP 25 V, BAP 50 V et BAP 75 V étaient supérieurs à 0,8, se

situant ainsi dans la plage requise pour le béton autoplaçant. Cependant, pour le mélange BAP 100 V, une valeur inférieure à 0,8 a été enregistrée, indiquant qu'il ne respecte pas les critères définis pour ce type de béton [101].

L'impact du sédiment de dragage (Vase) sur les propriétés de passage et de remplissage peut être plus clairement illustré à travers la Figure 5.7.

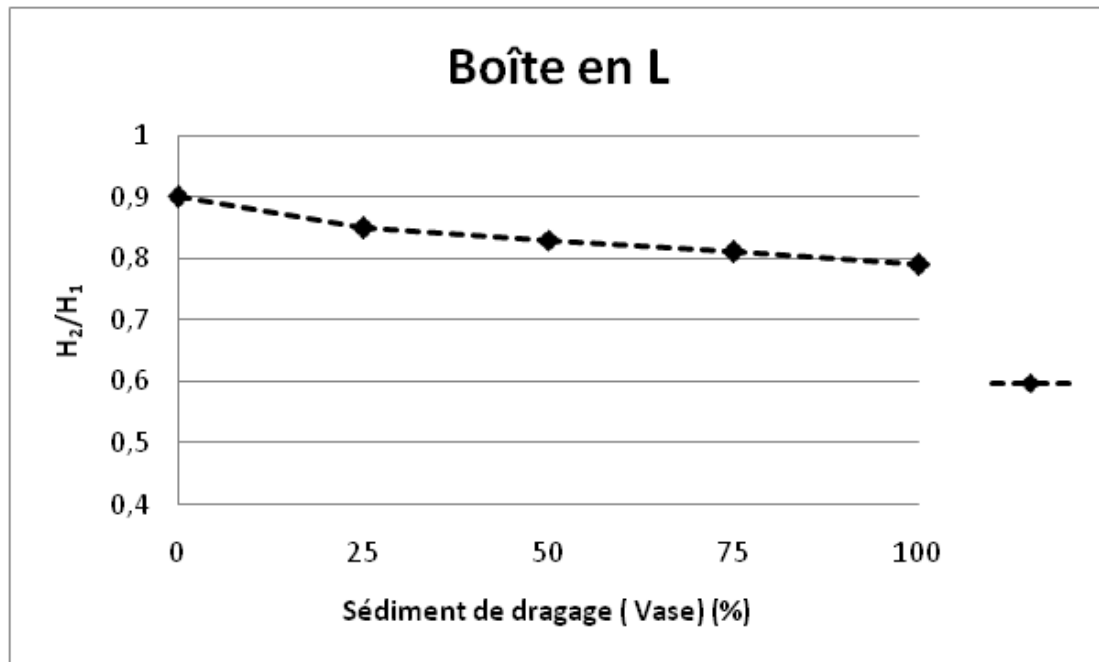


Figure 5.7: L'impact du Sédiment de dragage (Vase) sur les propriétés de remplissage et de passage dans le test de la boîte en L du BAP étudiés.

La croissance des quantités de particules fines dans le mélange de béton frais entraîne une consommation accrue de l'eau présente, réduisant ainsi sa mobilité et sa fluidité. Cela s'est produit dans les mélanges contenant des proportions variables de sédiments de dragage (Vase). Plus la quantité de ces derniers augmente, plus l'habileté à traverser les barres de la boîte en L ne diminue. Cependant, cet impact négatif reste dans la plage acceptable pour le béton autoplaçant dans les mélanges avec des proportions de 0, 25, 50 et 75 %. Quant au mélange contenant une proportion de 100 % de sédiments de dragage, le test de la boîte en L a enregistré une valeur de 0,79, inférieure à 0,8, considérée comme la valeur minimale autorisée pour ce type de béton.

➤ **Stabilité au tamis**

Le Tableau 5.3 indique que tous les conclusions du test de stabilité au tamis pour les mélanges étudiés se situent dans la plage requise pour le béton autoplaçant, limitée entre 3 % et 15 % [102].

Les résultats de l'expérience ainsi que les effets du Vase sur la propriété de résistance à la ségrégation des mélanges autoplaçants étudiés peuvent être illustrés dans la Figure 5.8.

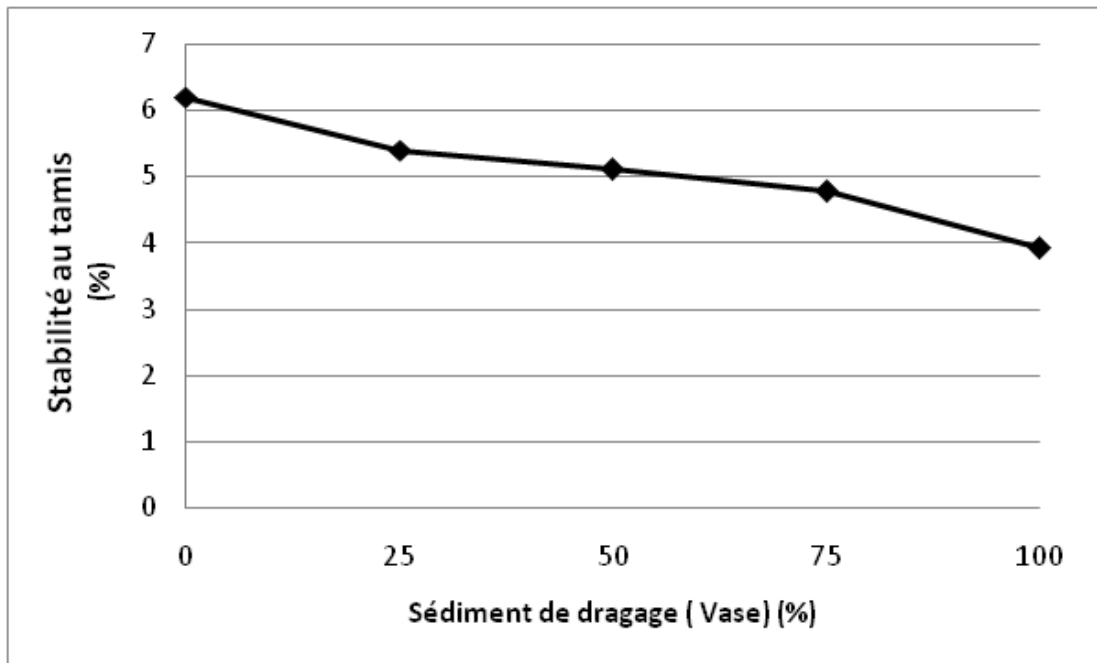


Figure 5.8: L'influence du Sédiment de dragage (Vase) sur la résistance à la ségrégation du BAP.

Concernant l'épreuve de stabilité au tamis, tous les échantillons ont manifesté une cohésion sans observer de séparation apparente. Les pourcentages enregistrés se sont conformés aux recommandations directrices, respectant des valeurs inférieures à 15 % et supérieures à 3 %, en accord avec la norme européenne NF EN 12350-11 [102]. Ces données témoignent de l'efficacité de l'incorporation de Vase comme un additif minéral dans la formulation du BAP pour renforcer sa résistance à la ségrégation.

### 5.3.2 L'effet du Sédiment de dragage (Vase) sur les propriétés durcies du BAP à base de sable de dunes

Dans la phase de durcissement, des tests significatifs ont été conduits sur les échantillons de béton à différents stades de solidification. Ces essais comprenaient la résistance à la compression et la résistance à la traction, dans le but d'évaluer la capacité des échantillons à résister à ces contraintes.

#### ➤ Résistance à la compression

Dans ce contexte, un essai de résistance à la compression a été effectué sur des échantillons cubiques de béton, chaque échantillon ayant des dimensions de 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>. Trois échantillons ont été utilisés pour obtenir la valeur moyenne de la résistance à la compression, permettant ainsi de réduire le risque d'erreurs et de maintenir la précision des résultats. Ces expériences ont été conçues conformément aux recommandations de la norme européenne NF EN 12390-3 [103], les tests de résistance à la compression ont été réalisés à 7, 14, 21 et 28 jours

Les effets de l'ajout de Vase à la formulation du béton autoplaçant sur la résistance à la compression sont plus clairement visibles à travers la Figure 5.9.

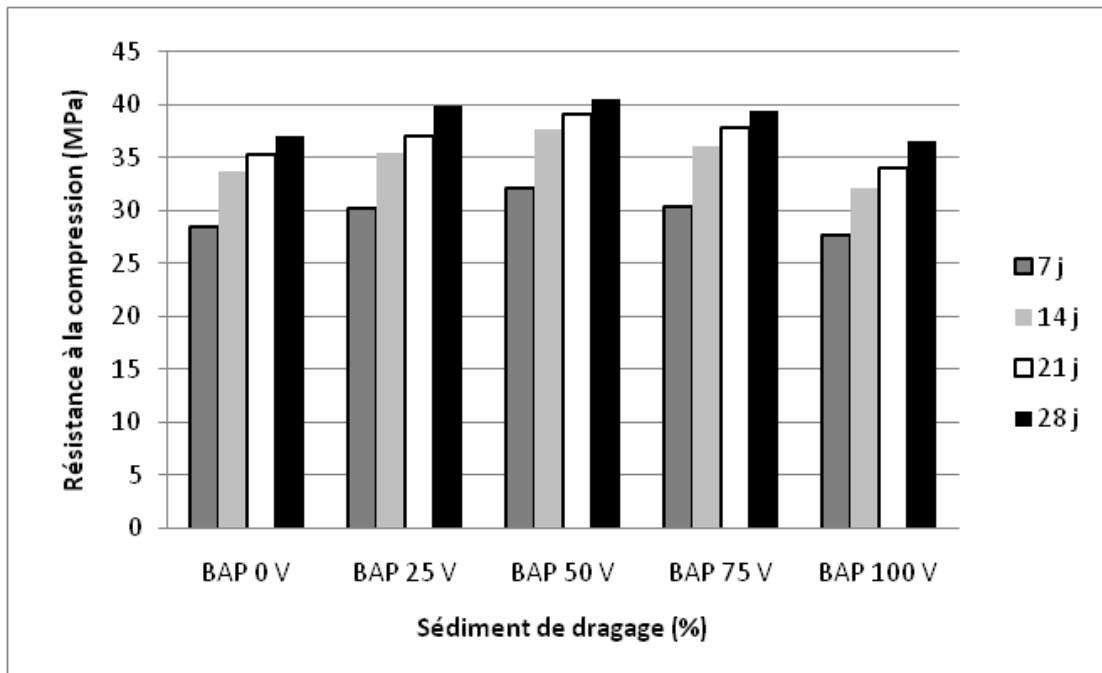


Figure 5.9: L'influence du Sédiment de dragage (Vase) sur la résistance à la compression du BAP.

Les résultats démontrent clairement une augmentation des valeurs de la résistance à la compression dans les échantillons de béton autoplaçant proportionnellement aux quantités de sédiments de dragage ajoutées aux mélanges BAP 25 V et BAP 50 V. Cette constatation confirme l'efficacité de cette substance en tant qu'additif minéral, contribuant à la formation d'un béton autoplaçant plus résistant face aux forces de compression élevées. Cet effet positif est dû à l'accroissement du taux de particules fines, favorisant ainsi la compacité de la matrice cimentaire et réduisant la taille des pores [1], considérée comme l'une des principales causes de la diminution de la résistance à la compression. De plus, l'absorption d'eau par les particules fines dans le mélange entraîne une diminution des quantités d'eau dans le béton, contribuant ainsi à améliorer sa résistance à la compression.

Cependant, une diminution progressive et un renversement de l'effet contraire sont observés dans les mélanges contenant des proportions de 75 et 100 % (BAP 75 V et BAP 100 V) de sédiments de dragage. Cette observation peut s'expliquer par le fait que les grandes quantités de particules fines absorbent des quantités importantes d'eau nécessaires à l'hydratation du ciment et à la complétion des réactions chimiques cimentaires indispensables au développement de la propriété de résistance à la compression.

#### ➤ **Résistance à la traction**

La résistance à la traction, qui mesure la capacité du béton à résister aux forces de traction, est une propriété cruciale dans diverses applications de construction. Pour évaluer cette propriété, des échantillons prismatiques de dimensions 7x7x28 cm<sup>3</sup> ont été soigneusement sélectionnés en raison de leur représentativité. Ces échantillons spécifiques permettent de mesurer avec précision la résistance à la traction par flexion du BAP. Cet essai a été effectué à l'âge de 28 jours.

Les effets du Sédiment de dragage (Vase) sur la propriété de résistance à la traction du béton autoplaçant consolidé sont clairement illustrés dans la Figure 5.10.

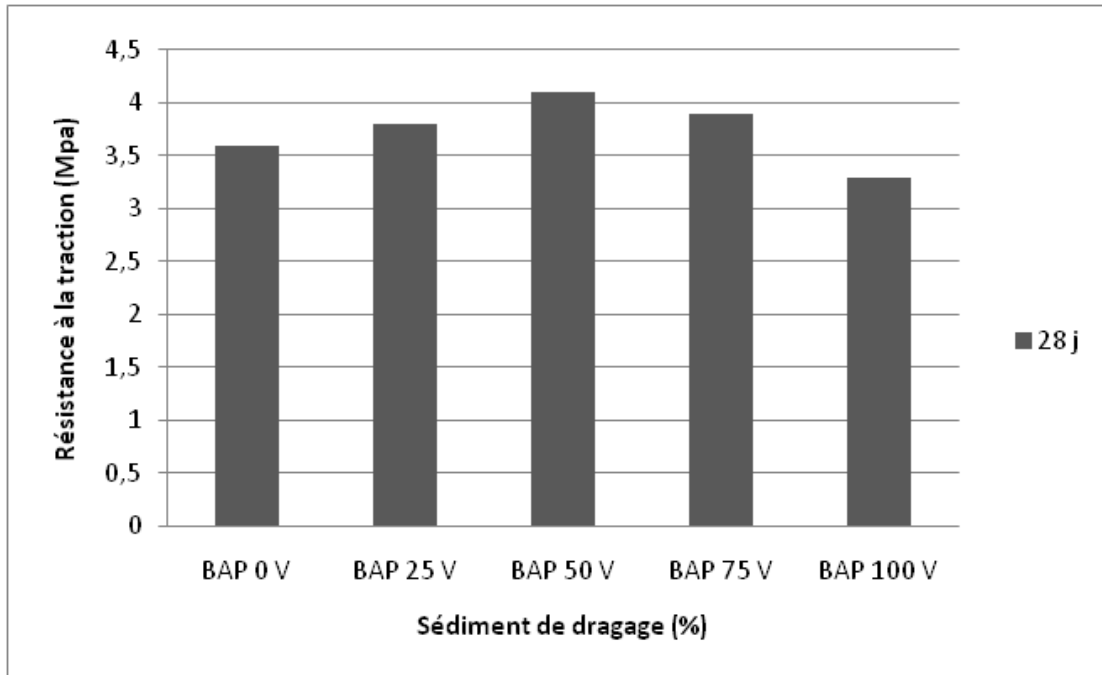


Figure 5.10: L'influence du Sédiment de dragage sur la résistance à la traction du BAP.

Les effets de l'ajout des sédiments de dragage au béton autoplaçant en remplacement du filler calcaire comme additif minéral sur la propriété de résistance à la traction sont similaires à ceux sur la résistance à la compression. En proportions de 25% et 50%, l'effet est bénéfique. Cependant, au-delà de ces proportions, l'effet devient inverse, entraînant une diminution des valeurs de résistance à la traction pour les échantillons étudiés.

En se basant sur les essais réalisés sur les échantillons dans les états frais et durci, nous sommes en mesure de sélectionner le meilleur rapport pour compenser le filler calcaire utilisée en tant qu'additif minéral par les sédiments de dragage (vase calcinée). Ce rapport optimal est de 50% dans la composition du BAP.

Le mélange de béton contenant 50% de sable de dunes et 50% de sédiments de dragage est choisi comme le meilleur mélange, incarnant les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant. Les propriétés du béton dans l'état frais ont été améliorées grâce à la présence du sable de dunes, tandis que les propriétés dans l'état durci ont bénéficié de la présence des sédiments calcaires. Cela a conduit à une synergie entre ces deux matériaux pour améliorer les propriétés du béton autoplaçant dans ses états frais et durci.

#### 5.4 Durabilité du béton autoplaçant

Cette section présente les résultats des tests de durabilité pour les mélanges BAP T, BAP 50 DS et BAP 50 V. Le mélange BAP T est considéré comme le témoin des expériences, ne contenant ni sable de dunes ni sédiments de dragage. Le mélange BAP 50 DS est composé à 50 % de sable de dunes uniquement, tandis que le mélange BAP 50 V contient 50 % de sable de dunes et 50 % de sédiments de dragage. Cela permet de comparer les résultats entre ces mélanges et de comprendre l'impact respectif du sable de dunes et des sédiments de dragage sur la durabilité du béton autoplaçant.

##### 5.4.1 Résistance à l'attaque de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ )

Les attaques acides sur le béton peuvent se produire dans des environnements tels que les réseaux d'assainissement et les zones industrielles. Ces attaques résultent souvent de la présence d'agents corrosifs dans les eaux usées ou dans les produits chimiques industriels. Les acides, tels que les acides sulfurique et chlorhydrique, peuvent entraîner des réactions chimiques avec les composants minéraux du béton, compromettant ainsi sa durabilité. Les zones sujettes à de telles attaques nécessitent des bétons spécialement formulés pour résister à ces conditions agressives, en utilisant des additifs ou des formulations adaptées qui minimisent les effets corrosifs des attaques acides. Cela garantit une meilleure durabilité du béton dans des environnements où ces attaques sont fréquentes.

La solution utilisée pour l'immersion a été préparé avec une concentration de 5 % d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) par rapport au volume d'eau distillée utilisé.

L'équation (5.1) de la réaction se produisant dans ce test peut être montrée comme suit [1].



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique  $\longrightarrow$  sulfate de calcium + eau

Les échantillons de l'âge de 28 jours sont immergés dans cette solution pendant des périodes déterminées, allant jusqu'à 8 semaines. À chaque intervalle d'immersion spécifié, des échantillons sont prélevés, leur poids est mesuré pour évaluer les variations de masse, et la résistance à la compression est mesurée pour comprendre

l'impact de l'immersion sur la perte de masse tout en préservant la propriété de résistance à la compression. Cela permet de déterminer l'efficacité de l'ajout de sable de dunes et de sédiments de dragage (Vase) dans la résistance aux attaques acides sur le béton autoplaçant.

La Figure 5.11 représente l'état des échantillons extraits de la solution d'immersion après une période de huit semaines. Cette image permet une comparaison visuelle entre eux et une observation des effets des attaques acides sur les échantillons.

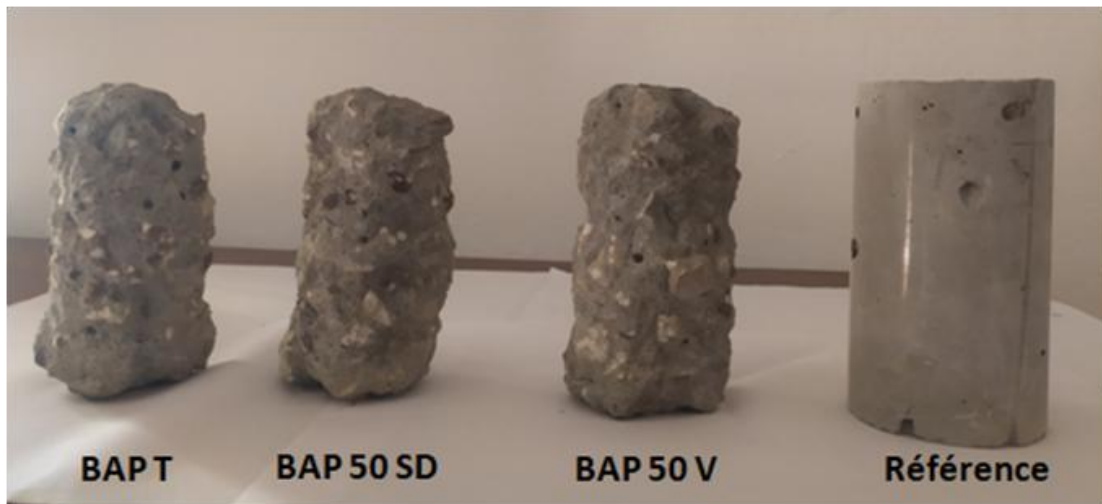


Figure 5.11: Observation visuelle des échantillons immergés pendant 8 semaines dans une solution de 5% d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ).

➤ **Variations de la masse**

Les variations de masse sont cruciales pour évaluer les performances du béton en termes de résistance aux attaques acides, car la perte de masse influence négativement sa durabilité et sa rigidité. Les pertes de masse des échantillons immergés dans l'acide sulfurique en fonction de la durée d'immersion sont illustrées dans la Figure 5.12.

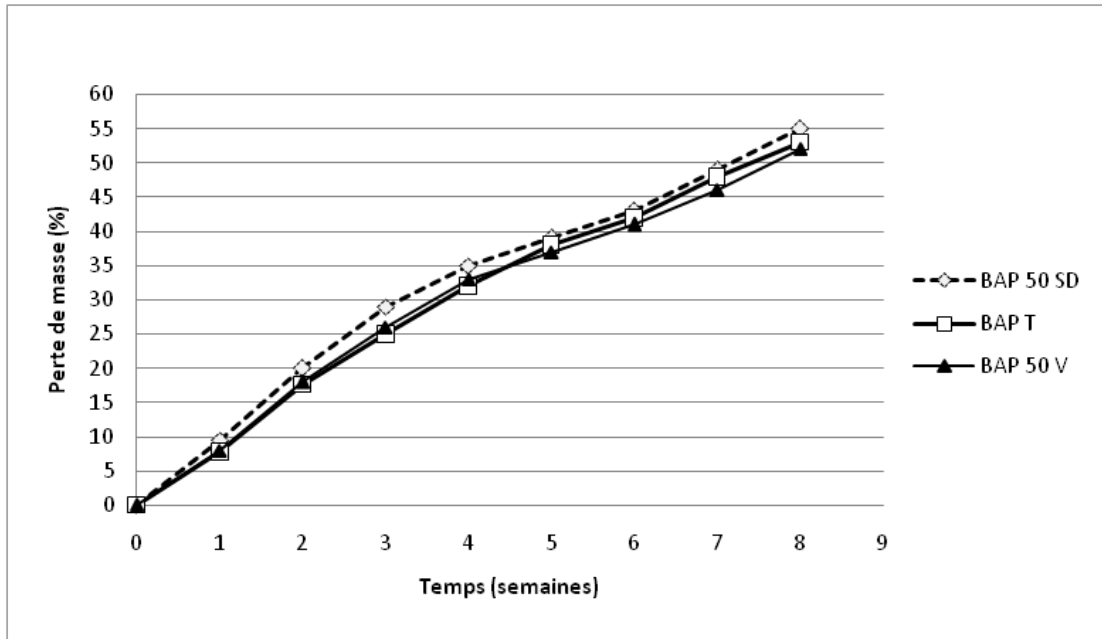


Figure 5.12: Perte de masse pour les BAP de l'âge de 28 jours immergés dans une solution à 5 % d'acide sulfurique en fonction de temps.

Les résultats montrent une perte significative de masse pour tous les échantillons de béton autoplaçant immergés dans une solution d'acide sulfurique pendant 8 semaines, avec une perte d'environ 55 %. Cependant, il existe des variations dans cette perte entre les groupes d'échantillons étudiés.

À tous les âges de test, le groupe BAP 50 SD, tous les échantillons ont montré la plus grande perte de masse, indiquant une moindre résistance aux attaques acides par la perte de poids.

La présence abondante de particules de sable dunaire de forme sphérique lisse réduit la cohésion des autres particules constitutives du béton [82], permettant ainsi une plus grande pénétration des acides à l'intérieur du béton pour réagir davantage avec les particules d'hydroxyde de calcium et former le gypse, considéré comme le produit de cette réaction chimique représentée dans l'équation (5.1). Cependant, la nature siliceuse de ce sable présente un aspect positif car il contient une très faible proportion d'oxyde de calcium qui réagit avec l'acide sulfurique, contrairement au sable concassé de nature calcaire qui contient une proportion élevée de cette substance. Remplacer la moitié de cette quantité de sable concassé par du sable dunaire a des effets opposés sur la résistance à cette attaque acide, ce qui explique la convergence des résultats avec les autres échantillons.

En revanche, les échantillons de BAPT ont montré une perte de masse plus faible au cours des quatre premières semaines, montrant une meilleure résistance aux attaques acides à ce stade. Cependant, après cette période, ils ont montré une perte de masse plus élevée au bout de cinq semaines.

Les échantillons de BAP 50 V, pendant les quatre premières semaines, ont montré une perte de masse plus importante que les échantillons de BAPT. Cependant, après cette période, ils ont montré une perte de masse plus faible, indiquant les effets bénéfiques des sédiments de dragage calcaires dans la résistance aux attaques acides, surtout après cette période.

La justification de ces résultats en termes de résistance à l'attaque acide réside dans l'augmentation de la compacité du béton, la réduction de la taille des vides, et la diminution de la porosité grâce à l'utilisation d'additifs minéraux. En examinant l'équation (5.1), on peut noter que cet acide réagit avec l'hydroxyde de calcium, une substance présente en proportions élevées dans les composants du béton tels que le sable concassé, le gravier, le filler calcaire, ainsi que le ciment. Cela entraîne une augmentation des réactions et la production de gypse, conduisant ainsi à une perte de poids, en particulier dans le mélange BAP T, suivi du BAP 50 SD. Cependant, dans le mélange BAP 50 V, la moitié de la quantité de sable concassé et aussi de la quantité de filler calcaire ont été compensées par du sable dunaire siliceux et des sédiments de dragage (Vase calciné), respectivement. Ces deux matériaux contiennent de faibles proportions d'oxyde de calcium nécessaire à la réaction, entraînant une diminution de la quantité de gypse formé et, par conséquent, une conservation accrue de la masse.

#### ➤ **Évaluation de la résistance à la compression**

Après l'extraction des échantillons à différentes étapes du test d'immersion dans l'acide sulfurique et la prise de leurs poids, un test de résistance à la compression est effectué pour évaluer comment l'échantillon est affecté par son exposition à cette solution acide en termes de résistance à la compression. Ceci permet de comprendre l'efficacité des matériaux tels que le sable de dunes et les sédiments de dragage en tant que composants dans le béton autoplaçant en termes de résistance aux attaques acides et de préservation de la durabilité des échantillons.

Les résultats de ce test sont illustrés dans la figure 5.13.

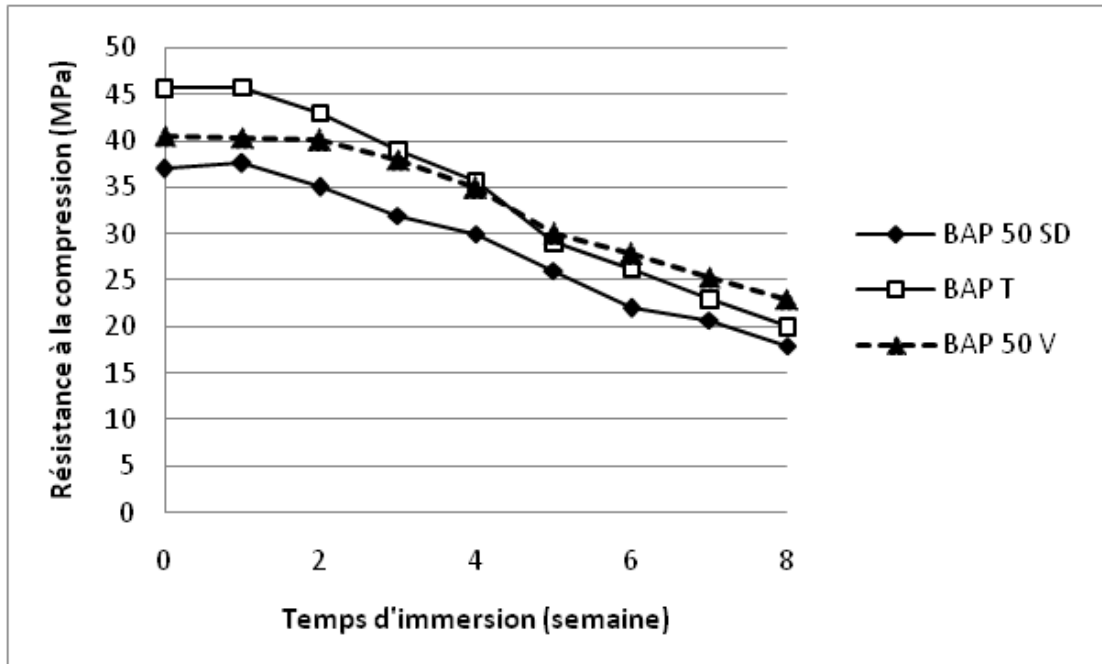


Figure 5.13: Évaluation de la résistance à la compression des échantillons de BAP immergés dans la solution de 5 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Les résultats des tests de résistance à la compression des échantillons de béton autoplaçant immergés dans une solution d'acide sulfurique sont en corrélation avec les résultats de la perte de masse. Au cours des quatre premières semaines, nous observons que les échantillons de BAP T ont conservé une résistance supérieure à celle des échantillons BAP 50 V, suivis des échantillons BAP 50 SD. Cependant, après cette période d'immersion, nous notons un changement dans l'ordre des échantillons en termes de résistance à la compression, avec les échantillons BAP 50 V en tête, suivis des échantillons BAP T, et enfin les échantillons BAP 50 SD.

Ces résultats peuvent être interprétés de la même manière que la perte de masse pour ces échantillons mentionnée dans le paragraphe précédent, la présence de quantités importantes de particules d'oxyde de calcium dans les échantillons de BAP T réagit avec l'acide utilisé pour former du gypse. En revanche, les échantillons de BAP 50 V contiennent des quantités beaucoup plus faibles de cette substance, réduisant ainsi les réactions, en particulier avec l'évolution de l'âge des échantillons, ce qui entraîne un durcissement accru du béton résultant l'achèvement des réactions dans la matrice cimentaire.

La détérioration des valeurs de résistance à la compression pour tous les échantillons est attribuable à leur perte de masse et au changement de leur forme géométrique en raison de la corrosion résultant de l'attaque acide qui réagit avec leurs composants.

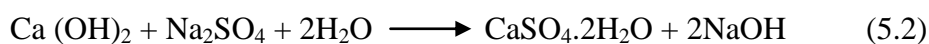
#### 5.4.2 Résistance à l'attaque de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

Le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) est un sel présent naturellement dans les eaux de surface et le sol. Il peut également être produit comme produit de réaction lors de certaines opérations industrielles.

Lorsqu'il réagit avec le béton, le sulfate de sodium peut avoir des effets néfastes. Il peut induire des changements dans les propriétés du béton en réagissant avec les aluminates et le calcium libres dans le béton, formant finalement des composés tels que les sulfates de calcium et d'aluminium.

Les sulfates de calcium se forment sous forme de dépôts solides à l'intérieur des pores du béton, ce qui peut entraîner une augmentation de son volume, provoquant des fissures et des dommages structurels. Ce phénomène est connu sous le nom de "défaçement par les sulfates de calcium" et peut se produire en présence de quantités importantes de sulfate de sodium dans l'eau ou le sol environnant la structure en béton.

L'équation (5.2) des réactions qui se produisent entre les composants du béton et cette solution peut s'écrire comme suit [113] :



La Figure 5.14 présente les échantillons de béton autoplaçant après la fin de l'essai d'immersion pendant 200 jours dans une solution de sulfate de sodium.



Figure 5.14: Contrôle visuel d'échantillons immergés pendant 200 jours dans une solution à 5% de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

L'effet de l'immersion dans cette solution est évalué à travers les changements de masse et de résistance à la compression

➤ **Variations de la masse**

Les variations de masse des échantillons de béton autoplaçant immergés dans une solution de sulfate de sodium au cours de la période d'essai sont illustrées dans la Figure 5.15.

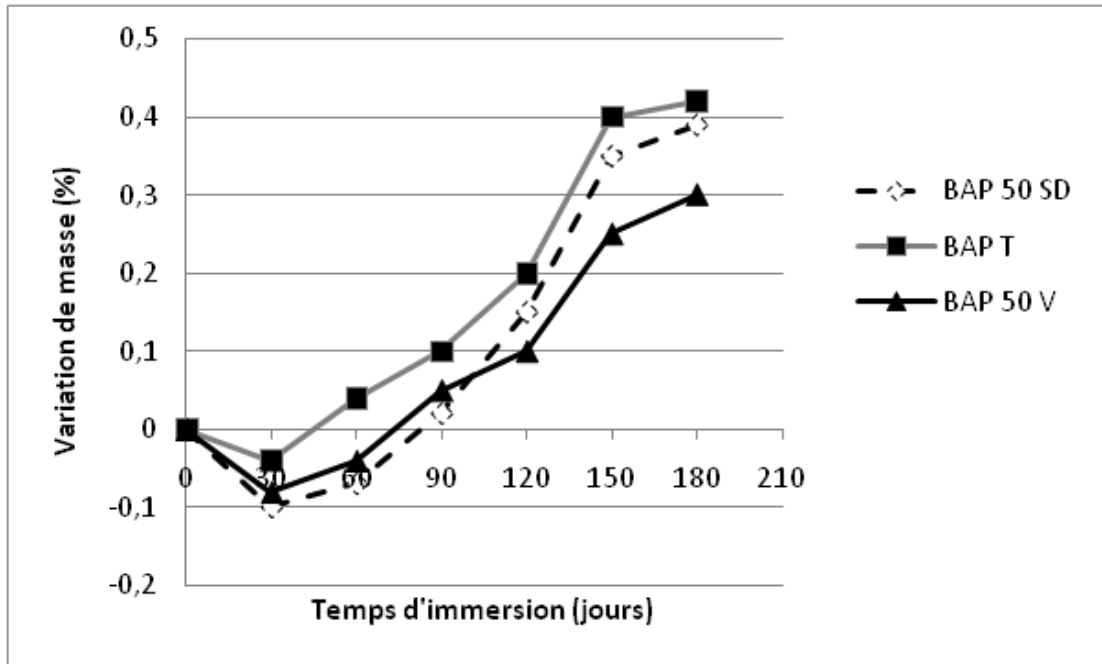


Figure 5.15: Perte de masse pour les BAP de l'âge de 28 jours immergés dans une solution à 5 % de sulfate de sodium en fonction de temps.

À travers la courbe, on peut observer une perte de masse initiale pour tous les échantillons de béton dans les premiers stades en raison du phénomène de diffusion [1]. Cependant, par la suite, on constate une augmentation de la masse de tous les échantillons, où les échantillons BAP T montrent la plus forte augmentation de masse, suivis par les échantillons BAP 50 SD, puis les échantillons BAP 50 V, et ce, à tous les âges des échantillons. On peut conclure de cet ordre quel échantillon est le plus résistant aux attaques des sulfates, car le changement de masse indique l'ampleur de l'impact de cette solution de sulfate sur les BAP.

Cette évolution peut être expliquée par la persistance de la création d'hydrates dans les différents BAP, aussi par la formation de gypse et d'ettringite secondaire résultant de la réaction des hydrates, notamment la portlandite, avec les sulfates présents dans le milieu. De plus, l'augmentation de la masse peut résulter de l'eau occupant les fissures, ainsi que de l'eau utilisée pour induire la formation d'une phase hydratée, telle que l'ettringite [1].

#### ➤ Évaluation de la résistance à la compression

Les résultats de l'évaluation de la résistance à la compression d'échantillons immergés dans une solution de sulfate pendant 200 jours sont présentés dans la Figure 5.16.

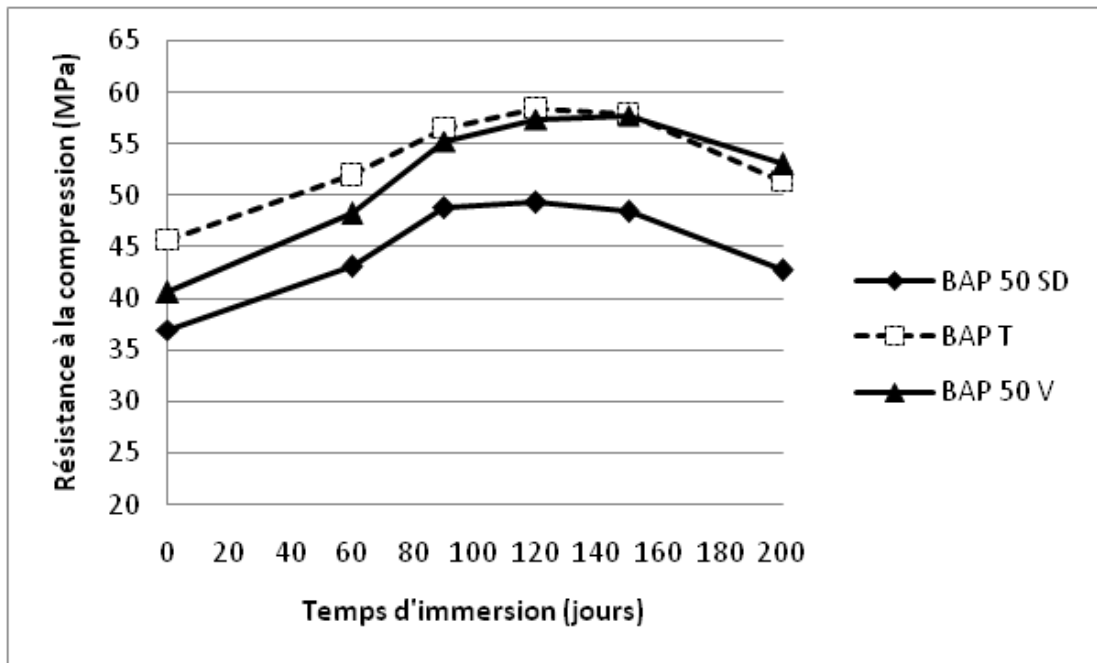


Figure 5.16: Évaluation de la résistance à la compression des échantillons de BAP immergés dans la solution de 5 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Le graphique montre une évolution des valeurs de la résistance à la compression pour les échantillons BAP T et BAP 50 SD jusqu'au jour 120, suivie d'une diminution jusqu'à la fin de l'essai au jour 200. Les échantillons BAP T surpassent constamment les échantillons BAP 50 SD à toutes les étapes de l'essai.

Quant aux échantillons BAP 50 V, les valeurs de la résistance à la compression ont continué à augmenter jusqu'au jour 150, puis ont commencé à diminuer jusqu'à la fin de l'essai. Il est important de noter que les valeurs de ces échantillons ont augmenté pour égaler celles des échantillons BAP T au jour 150, puis les ont dépassées au jour 200. Cela signifie qu'ils sont plus résistants aux attaques sulfatiques.

On peut expliquer l'évolution de la résistance à la compression dans les premières étapes par la poursuite du durcissement du béton et l'achèvement des réactions cimentaires.

La diminution ultérieure de la résistance est due à la formation de gypse et d'ettringite, entraînant une expansion et l'apparition de fissures dans le béton, affaiblissant ainsi sa résistance à la compression.

La supériorité des échantillons BAP 50 V peut être attribuée au fait que ces échantillons contiennent des quantités moindres de particules d'oxyde de calcium, qui réagissent avec la solution de sulfate pour former du gypse et de l'ettringite. Cela

réduit la taille des expansions et limite l'apparition de fissures, contribuant ainsi à maintenir une meilleure résistance à la compression.

### 5.4.3 Résistance à la Pénétration Rapide du Chlorure

Le test de "Résistance à la Pénétration Rapide du Chlorure" mesure la capacité du béton à résister à la pénétration rapide des ions chlorure, souvent utilisé pour évaluer la durabilité du béton face à des environnements agressifs tels que ceux contenant des sels, comme le chlorure de sodium. Dans ce test, des échantillons de béton sont exposés à une solution de chlorure de sodium, simulant des conditions réelles. La résistance du béton à la pénétration des chlorures est cruciale pour prévenir la corrosion des armatures métalliques à l'intérieur du béton, ce qui peut compromettre l'intégrité structurelle à long terme.

Les résultats de ce test offrent des indications sur la performance du béton dans des environnements exposés aux chlorures, contribuant ainsi à concevoir des structures durables. Les résultats de ce test sont illustrés à la Figure 5.17

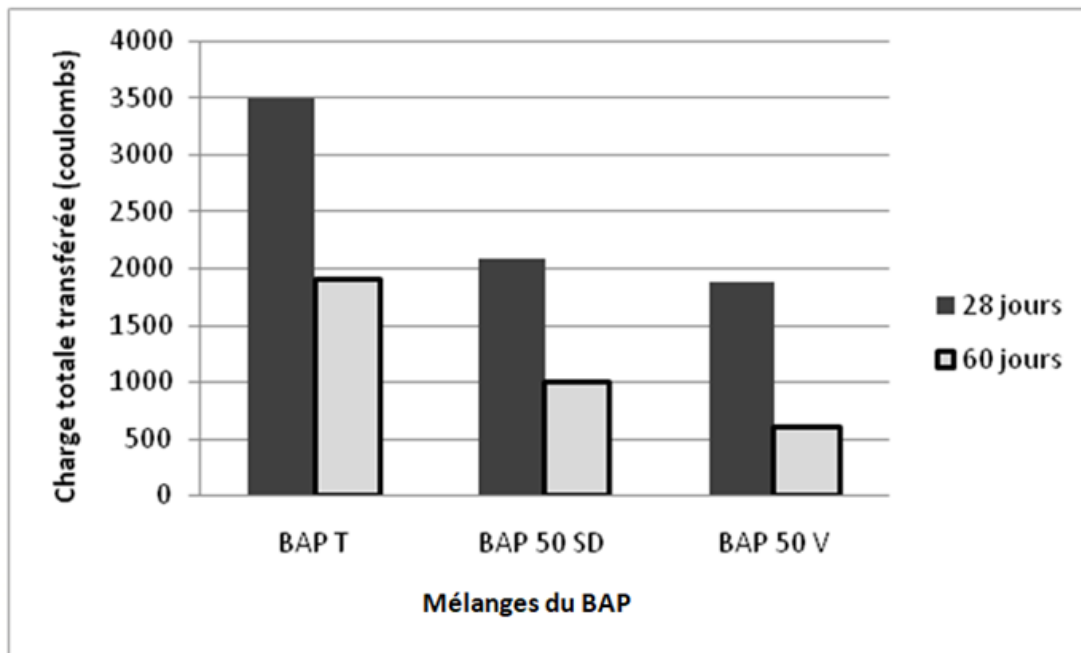


Figure 5.17: Charge totale traversant les échantillons de BAP étudiés

Le graphique révèle que les échantillons BAP T ont subi une quantité plus importante de charges, suivis des échantillons BAP 50 SD, puis des échantillons BAP 50 V qui ont enregistré la plus faible quantité de charges traversant leurs structures.

Cette disparité dans les résultats est principalement due à la porosité et à la taille des vides à l'intérieur du béton, car une porosité plus élevée facilite la pénétration des ions à travers le matériau [114].

L'avantage observé chez les échantillons BAP 50 SD et BAP 50 V en résistance à la pénétration peut s'expliquer par la présence de particules plus fines dans le sable de dunes et les résidus de dragage. Ces particules contribuent à remplir même les vides microscopiques, corrigeant ainsi la structure granulaire du béton, réduisant ainsi la porosité et la taille des vides (voir la Figure 5.19).

Ces résultats démontrent l'efficacité des matériaux ajoutés à la composition du béton dans la résistance à la pénétration des ions chlorure et, par conséquent, dans la durabilité du matériau.

#### **5.4.4 Absorption capillaire**

L'absorption capillaire est une propriété importante de la structure de la matrice de béton qui mesure sa capacité à absorber l'eau par capillarité. Cette propriété est étroitement liée à la porosité de la matrice, influençant ainsi la durabilité et la résistance globale du béton. Plus la capillarité est élevée, plus le béton risque d'absorber l'humidité, ce qui peut conduire à des problèmes tels que la fissuration due au gel-dégel, la corrosion des armatures métalliques, et d'autres formes de dégradation.

Une absorption capillaire réduite est souvent associée à une matrice plus dense, ce qui peut améliorer la résistance aux agressions extérieures. La gestion de cette propriété est cruciale dans la conception du béton, car elle contribue à la protection contre les effets néfastes de l'environnement et garantit une durabilité accrue du matériau.

Les résultats du test d'absorption capillaire pour les éprouvettes de béton autoplaçant sont présentés dans la Figure 5.18.

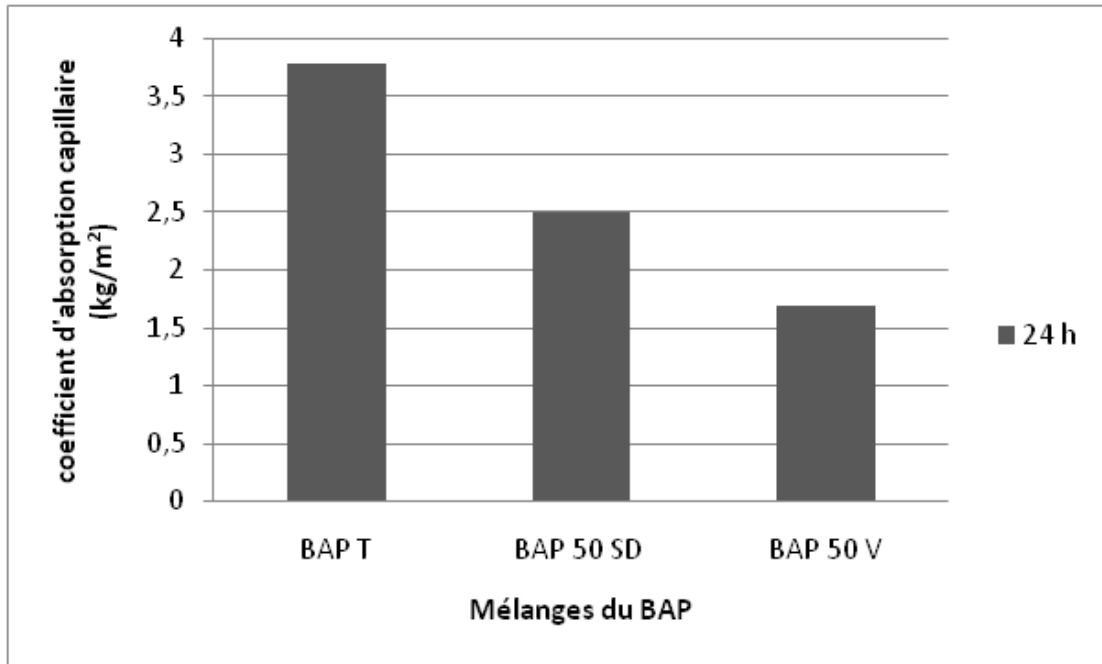


Figure 5.18: Coefficient d'absorption capillaire (à 24 h) des BAP étudiés.

Les résultats indiquent que les échantillons de BAP T présentent le taux d'absorption le plus élevé, suivi des échantillons de BAP 50 SD, et enfin des échantillons de BAP 50 V. Cela reflète la taille de la porosité dans les échantillons de béton, où l'eau résultante de l'absorption capillaire remplit les vides à l'intérieur du béton, augmentant ainsi sa masse et élevant le taux d'absorption mesuré lors de l'essai.

La variation entre les échantillons est attribuable à la quantité de particules fines de sable de dune et de Vase qui confèrent au béton une densité accrue, réduisant ainsi la taille des vides et, par conséquent, le taux d'absorption.

La Figure 5.19 montre la taille des pores qui peuvent être observés à l'œil nu dans les échantillons de béton étudiés.

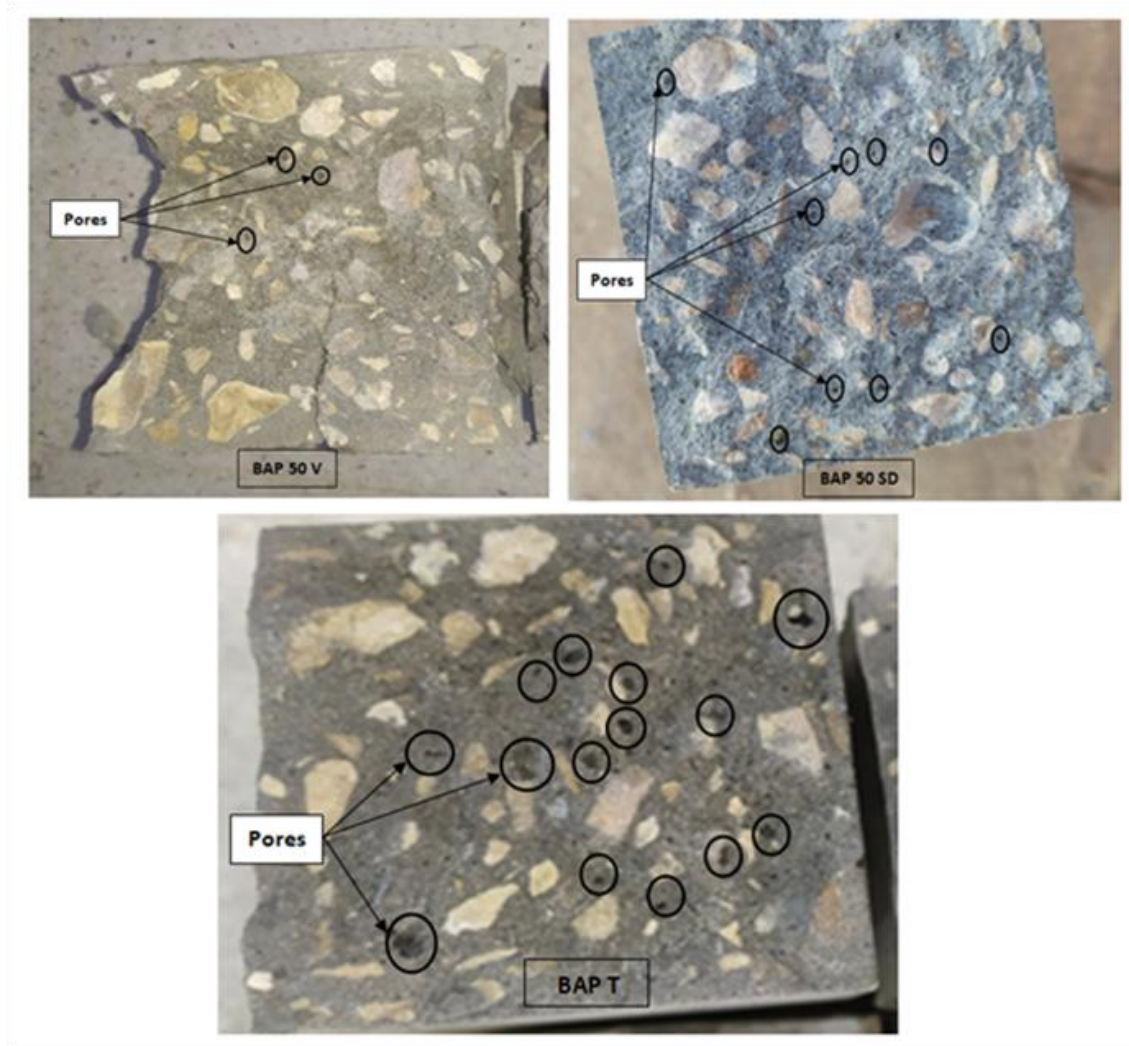


Figure 5.19: Les pores visibles à l'œil nu dans les échantillons de BAP étudiés.

À travers la figure, on peut observer la taille et le nombre des pores visibles à l'œil nu dans les échantillons indiqués sur la figure. Les échantillons BAP T présentent un nombre plus élevé de pores et des tailles plus grandes, suivis par les échantillons BAP 50 SD avec des pores moins nombreux et de tailles plus petites, puis les échantillons BAP 50 V qui contiennent très peu de pores, de taille très réduite. Ceci explique et soutient les résultats des tests d'absorption capillaire et de pénétration rapide du chlorure.

### 5.5 Conclusion

Le but de ce chapitre expérimental était de tester l'ajout de sable de dunes comme substitut partiel ou total au sable concassé, et de tester les sédiments de dragage (Vase) comme substitut partiel ou total pour le filler calcaire dans la formulation du béton autoplaçant (BAP) et d'évaluer l'impact de ces deux matériaux sur ses propriétés rhéologiques, mécaniques, et sa durabilité à travers des essais spécifiques à ce type de béton.

- Les résultats indiquent que l'ajout de sable de dunes améliore légèrement les propriétés rhéologiques du béton autoplaçant, surtout à des proportions relativement faibles, jusqu'à 50% du sable total utilisé.
- Les propriétés de résistance à la compression et à la traction diminuent proportionnellement à l'augmentation de la quantité de sable de dunes incorporé dans le mélange, mais cette diminution reste dans les limites acceptables, surtout pour des proportions faibles à moyennes.
- À travers les essais, une proportion de 50% a été choisie comme la meilleure proportion pour remplacer le sable concassé par le sable de dunes dans la formulation du BAP.
- Le remplacement du filler calcaire par des sédiments de dragage (Vase calciné) dans le BAP entraîne une diminution de ses propriétés rhéologiques, mais reste dans les limites acceptables pour des proportions de 25%, 50%, et 75%.
- Les valeurs de résistance à la compression et à la traction augmentent proportionnellement avec l'augmentation des quantités de Vase ajoutées au béton.
- La meilleure proportion pour remplacer le filler calcaire par des sédiments de dragage dans la formulation du BAP est de 50%.
- Les particules fines dans le sable de dunes et le Vase améliorent la durabilité du BAP en augmentant son densité et en réduisant la porosité. La composition chimique de ces deux matériaux renforce la résistance du béton aux attaques acides et aux sulfates.
- L'ajout de 50% de sable de dunes et 50% de sédiment dz dragage permet d'obtenir un BAP avec des propriétés rhéologiques et mécaniques recommandées, ainsi qu'une meilleure durabilité.

Cette étude expérimentale constitue une avancée positive dans la démonstration de l'importance de l'utilisation de matériaux locaux à faible coût dans la formulation du BAP.

# Conclusion générale

---

Cette étude a été entreprise dans le but de valoriser les matériaux locaux tels que le sable de dunes de la région de Sidi Khouiled, wilaya de Ouargla, et les sédiment de dragage (Vase calciné) du barrage d'Aïn Dalia , wilaya de Souk Ahras, dans la formulation du béton autoplaçant (BAP) avec des propriétés rhéologiques, mécaniques et une durabilité améliorées.

Au début de cette expérimentation, nous avons étudié les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés dans la composition du béton. Ensuite, la première partie de l'expérimentation a débuté en se concentrant sur l'utilisation de différentes proportions de sable de dunes, allant de 25, 50, 75 à 100 %. Des essais en état frais et durci ont été effectués sur ces mélanges pour comprendre l'impact sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP. Les résultats ont permis de déterminer la meilleure proportion de sable de dunes dans la composition du BAP, fixée à 50 %.

Dans la deuxième partie de l'expérimentation, l'effet de Sédiment de dragage (Vase) en remplacement du filler calcaire a été étudié. Cinq mélanges ont été formés, tous contenant 50 % de sable de dunes et 50 % de sable concassé. Ces mélanges différaient dans la quantité de fines (fines) ajoutées, avec des proportions de 0, 25, 50, 75 et 100 %. Cela a permis d'étudier les effets de l'ajout de ce matériau et de déterminer la meilleure proportion pour les tests de durabilité.

Suite à ces résultats, la proportion de 50 % a été choisie comme la meilleure proportion pour remplacer le filler calcaire par la Vase pour former le BAP. Ensuite, des essais de durabilité ont été réalisés sur trois mélanges sélectionnés pour ces tests : les échantillons BAP T, en tant que témoin, ne contenant ni sable de dunes ni Vase ; les échantillons BAP 50 SD, contenant uniquement 50 % de sable de dunes et sans Vase; et enfin les échantillons BAP 50 V, contenant 50 % de sable de dunes et 50 % de Vase Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- L'ajout de sable de dunes jusqu'à 75 % améliore les propriétés rhéologiques du BAP, telles que l'étalement, le remplissage et la résistance à la ségrégation, en raison de la présence de particules fines et lisses favorisant la mobilité du béton.

- À mesure que la quantité de sable de dunes augmente dans le béton, les propriétés de résistance à la compression et de traction diminuent légèrement proportionnellement à cette augmentation.
- L'ajout de sédiment de dragage (Vase) en tant qu' addition minérale dans le BAP entraîne une légère diminution de ses propriétés rhéologiques, restant cependant dans les recommandations pour des proportions allant jusqu'à 75 %, en raison des quantités importantes de fines nécessitant plus d'eau de gâchage.
- Les propriétés de résistance à compression et de traction augmentent avec l'ajout de Vase, grâce à la composition chimique et aux propriétés physiques de ce matériau.
- Les tests de durabilité confirment l'importance du sable de dunes et des Vases dans la préservation de la durabilité du BAP, surtout à des âges avancés, contre les attaques agressives et les conditions environnementales.

L'association de ces deux matériaux apparaît comme une approche novatrice, mais efficace, pour améliorer les propriétés du BAP tout en préservant sa durabilité. Le BAP préparé avec ces matériaux complémentaires présente des propriétés acceptables et satisfaisantes, tant au stade du mélange qu'au cours de sa période de service pour les structures construites à partir de celui-ci. Cette recherche contribue ainsi à la promotion de l'utilisation durable de matériaux locaux dans la construction de béton autoplaçant. Les connaissances acquises à travers cette étude ouvrent la voie à des futures recherches et applications, stimulant ainsi le domaine du génie civil vers des pratiques plus durables et efficientes.

# Références bibliographiques

---

- [1]: **Belaribi O.** [Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane]. Thèse de doctorat. Université Cergy-Pontoise et Université de Mostaganem .**2015.**
- [2]: **Laifa W.** [Contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons autoplaçants]. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar – Annaba . **2015.**
- [3]: **Benakli S.** [Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction]. Mémoire de Magistère. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou . **2013.**
- [4]: **Afnor.** NF EN 197-5. Ciment – Partie 5 : Ciment Portland composé CEM II/C-M et Ciment composé CEM VI, Afnor Editions, 1<sup>er</sup> mai 2021
- [5]: **Zeghad M.** [Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons : bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP)]. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. **2018.**
- [6]: **Bezzi T.** [Etude et caractérisation d'un béton autoplaçant fait à base d'un ciment avec ajout d'argile cuite et broyée]. Mémoire de Magistère. Université Abderrahmane Mira – Bejaia . **2011.**
- [7]: **Diederich P.** [Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton]. Thèse de doctorat. Université de Toulouse – France. **2010.**
- [8]: **Derabla R.** [Influence des additions minérale sur le comportement au jeune âge et à long terme des BAP traités thermiquement]. Thèse de doctorat. Université de Guelma. **2015.**
- [9]: **Khayat K.H.** [Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete]. ACI Material journal, vol.95 N°2, **1998.**
- [10]: **Traetteberg A.** [silica fume as a pozzolanic material]. Il cemento 75-3, 369-375, **1978.**
- [11]: **NF EN 15167-1.** [Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité]. **2006.**
- [12]: **AFGC.** [Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants]. (janvier **2008**).
- [13]: **Torrenti J M. Aloia-Schwartzentruber L.** [Le grand livre des bétons, Connaissances et pratiques - Avancées environnementales - Réglementation et cadre normatif]. **2014.**
- [14]: **Okamura H. et Ouchi M.** [Self-compacting high performance concrete]. Progress in Structural Engineering and Materials, vol. 1, n°4, p. 378-383. **1998.**
- [15]: **Daddy Kabagire K.** [Modélisation expérimentale et analytique des propriétés rhéologiques des bétons autoplaçant]. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke – Canada . **2018.**
- [16]: **Turcry Ph.** [Retrait et fissuration des bétons autoplaçants, influence de la

- Formulation]. Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, **2004**.
- [17]: **Petersson O. Billberg P. Van B.** [A model for self-compacting concrete]. RILEM PROCEEDINGS. **1996**.
- [18]: **Tangtermsirikul S. Van B.** [Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete]. Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering. Bangkok. Thailand. p 58-69. **1995**.
- [19]: **De larrard F. SEDRAN T.** [Une nouvelle approche de la formulation des bétons]. Laboratoire centrale des ponts et chaussées, Centre de Nantes, France. **1999**.
- [20]: **NF EN 206.** [Béton - Spécification, performances, production et conformité]. Novembre **2014**.
- [21]: **Assié S.** [Durabilité des bétons autoplaçants]. Thèse de doctorat. L'Institut National
- [22]: **JIN.** [Properties of mortar for self-compacting concrete] Doctoral thesis, University of London. **2002**.
- [23]: **Utsi. EMBORG. CARLSWARD.** [Relation between workability and rheological parameters]. Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 154-164. **2003**
- [24]: **Benzaid M.** [Contribution a l'étude du comportement a Haute températures des bétons autoplaçants]. Thèse de Doctorat. Université de Guelma. **2017**.
- [25]: **NF EN 12350-10.** [Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L]. Novembre **2010**.
- [26]: **Nécira B.** [Développement des bétons autoplaçant à hautes performances: influence de la composition]. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra . **2018**.
- [27]: **Baudouin M A.** [Influence des caractéristique rhéologiques des bétons autoplaçants sure leur durabilité]. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke – Canada .**2015**.
- [28]: **NF EN 12350-11.** [Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis]. Novembre 2010.
- [29]: **Gibbs J. Zhu W.** [Strength of hardend Self-Compacting concrete]. Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete. Stockholm, Suède. pp 199-209. **1999**.
- [30]: **Boukni B.** [Contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants]. Thèse de doctorat .Université Mentouri – Costantine . **2012**.
- [31]: **Desnerck. Desnerck P. Boel V. Craeye B. Van Itterbeeck P.** [Chapter 2: Mechanical Properties]. In: RILEM State-of-the-Art Reports: Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. Editors: Khayat K.H., De Schutter G. Technical Committee 228-MPS. pp. 15-72. **2014**.
- [32]: **Milla J, Cavalline T. L, Rupnow T. D, Melugiri-Shankaramurthy B, Lomboy G, and Wang K.** [Methods of Test for Concrete Permeability: A Critical Review].

Advances in Civil Engineering Materials 10, no. 1 (2021): 172–209.  
<https://doi.org/10.1520/ACEM20200067>

- [33]: [http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche\\_46.htm](http://www.explorations-architecturales.com/data/new/fiche_46.htm)
- [34]: **J. Rouquerol et al.** [Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)], Pure & Appl. Chem, vol. 66, p. 1739–1758. **1994.** (DOI [10.1351/pac199466081739](https://doi.org/10.1351/pac199466081739)).
- [35]: **Comité Euro-International du Béton.** [A Guide to the Comité Euro-International du Béton, n°225].p 82.**1996.**
- [36]: **Boel V. Audenaert K. De Schutter G.** [Characterization of the pore structure of hardened self-compacting concrete]. 12<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. Canada. Montreal. **2007.**
- [37]: **RILEM Technical Committee.** [Final report of RILEM TC 205-DSC: durability of self compacting concrete. Materials and Structures]. 41:225–23. **2008 .**
- [38]: **Setra.** [Ponts mixtes - Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles]. Septembre. **1995.**
- [39]: **Baron J. Sauterey R.** [Le béton hydraulique. 2<sup>ème</sup> édition]. Presses de l'école Nationale des Ponts et chaussées. **1988.**
- [40]: **Babafemi A, J . Boshoff W, P.** [Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading]. Cement and Concrete Composites 55: 62-69. **2015.**
- [41]: **García-Taengua E. Arango S, J. Martí-Vargas R. Serna P.** [Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state]. Construction and Building Materials 65: 321-329. **2014.**
- [42]: **Benkechache G. Boukni B. Houari H.** [Behaviour of the reinforced metal fibre concretes under request of pure inflection]. The First International Engineering Sciences Conference-IESC. **2008.**
- [43]: **Bensebti S. Houari H. Aggoun S.** [Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base des matériaux locaux]. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Université Mentouri Constantine. **2008.**
- [44]: **Proust E. Pons G.** [Macroscopic and microscopic behavior of self-compacting concrete creep and shrinkage]. Proc. of Concreep 6: 569-574. **2001.**
- [45]: **De Schutter G. Bartos P, J. Domone P. Gibbs J.** [Self-compacting concrete]. **2008.**
- [46]: **Turcry P. Roziere E. Loukili A.** [Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants]. XXIIèmes Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble. **2005.**
- [47]: **Leemann A. Hoffmann C.** [Properties of self-compacting and conventional concrete–differences and similarities]. Magazine of Concrete Research 57(6): 315-319. **2005.**
- [48]: **Heirman G. Vandewalle L, D. Van Gemert V. Boel K. Audenaert G. De Schutter. Desmet B. Vantomme J.** [Time-dependent deformations of limestone powder type self-compacting concrete]. Engineering Structures 30(10): 2945-2956. **2008.**

- [49]: **Loser R. Leemann A.** [Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete]. *Materials and structures* 42(1): 71-82. **2009.**
- [50]: **Leemann A. Lura P. Loser R.** [Shrinkage and creep of SCC–The influence of paste volume and binder composition]. *Construction and Building Materials* 25(5): 2283-2289. **2011.**
- [51]: **Guemmedi Z. Escadeillas G. Toumi B. Houari H. Clastres P.** [Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciments]. 1<sup>er</sup> congrès international sur la technologie et la durabilité du béton CITEDUB 1, USTHB Alger, mai **2004.**
- [52]: **Badoz C. Francisco P. Rougeau P.** [A Performance Test to Estimate Durability of Concrete Products Exposed to Chemical Attacks]. *Proceedings of the Second International Congress of FIB*, June 5 -8, **2006.**
- [53]: **Kostuch J, A. Walters G,V. Jones T,R.** [High performance concrete incorporating metakaolin]. *Concrete 2000*, University of Dundee, p. 1799-1811, **1993.**
- [54]: **GCI – 714.** [Cours : Durabilité et Réparations du Béton], Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet. **2009.**
- [55]: **Mehta P.K.** [Sulfate Attack on Concrete” A Critical Review]. *Materials Science of Concrete III*, The American Ceramic Society, pp. 105-130, **1993.**
- [56]: **Santhanam M. Cohen M, D. Olek J.** [Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed Mechanisms]. *Cement and Concrete Research* 33 ; 341–346. **2003.**
- [57]: **Santhanam M. Cohen M, D. Olek J.** [Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 1. Proposed Mechanisms]. *Cement and Concrete Research* 32 (6) 915– 921. **2002.**
- [58]: **Tagnit-Hamou A. Petrov N.** [Durability of Concrete in a Very Aggressive Environment]. *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy*, Montréal, Québec, Canada, 29 avril au 4 mai, pp 420-430, **2000.**
- [59]: **Siad H.** [La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolaniques et fillers calcaires]. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf. **2010.**
- [60]: **Saetta A, V.** [SCHREFLER B.A., VITALIANI R.V., “2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials]. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n° 8, pp 1703-1712, **1995.**
- [61]: **Roys K. Poh K, B. Northwood D.O.** [Durability of concrete, accelerated carbonation and weathering studies]. *Building and Environment*, 34, pp 597-606, **1999.**
- [62]: **Chaussadent T.** [Analyse des mécanismes de carbonatation du béton]. *Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons’. Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées a la durabilité’, pp 75-87, 1997.*
- [63]: **Thiery M.** [Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, Prise en des effets cinétiques et des modifications microstructurales et

- hydriques]. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées' LPC, OA 52, 2006.
- [64]: **Sakata K.** [Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete]. CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- [65]: **Boel V. Audenaert K. De schutter G.** [Experimental durability evaluation of self-compacting concrete with limestone filler]. Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 297-303, 2005.
- [66]: **Dinakar P. Babu K, G. Santhanam M.** [Corrosion resistance performance of high volume fly-ash self-compacting concretes]. Magazine of Concrete Research, vol. 61, no2, pp. 77-85, 2009.
- [67]: **Khunthongkea W, J. Tangtermsirikul S. Leelawat T.** [A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete]. Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 9, pp. 744-753, 2006.
- [68]: **Sulapha P. Wong S, F. Wee T, H. Swaddiwudhipong S.** [Carbonation of concrete containing mineral admixtures]. J. Mater. Civil Eng.; 134-43, 2003.
- [69]: **Sisomphon K., Franke L.** [Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials]. Cement and Concrete Research, pp. 1647-1653, 2007.
- [70]: **Rackel S.N.** [Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash]. Thèse de doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier. mai 2001.
- [71]: **Ben Dhia M, H.** [Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien]. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 213 - Janvier-Février - RÉF. 4159 - PP. 33-42.1998.
- [72]: **Garas .** [Effet de la teneur en fines sur le comportement des graves non traitées : application au sable du désert], DEA - ENIT, Tunisie, 75 pages. 1994.
- [74]: **Ould sid A, C . Havard H. Valin C.** [Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie]. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 199, sept.-oct., pp. 27-34. 1995.
- [74]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Dune>.
- [75]: **Azzouz H.** [Etude des bétons à base des sables de dune]. Mémoire de magister. Université Mohamed kheider- Biskra. 2009.
- [76]: **Kocurek G. Townsley M. Yeh E. Havholm K. Sweet M,L.** [Dune and dune-field development on Padre Island, Texas, with implications for interdune deposition and water-table-controlled accumulation]. Journal of Sedimentary Research, 62-4, pp. 622 - 635. 1992.
- [77]: **Wasson R,J. Hyde R.** [Factors determining desert dunes type]. Nature, 304, pp. 337-339. 1983.
- [78]: **Chavaillon J.** [Étude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara Nord Occidental (de Colomb-Béchar à Reggane)]. Edition du CNRS, Paris, p. 394. 1964.

- [79]: **Guermi L.** [Contribution a l'amélioration de certaines Caractéristiques du béton de structure à base de Sable de dune corrigé et renforcé par des fibres Métalliques]. Mémoire Magister. Université kasdi merbah- Ouargla. **2013.**
- [80]: **Zeghichi L. Lahmadi A. BENGHAZI Z.** [Contribution à l'étude des caractéristiques du sable de dune et de son effet sur le comportement des bétons autoplaçants]. ACMA 09-12 Mai, Fès, Maroc. **2012.**
- [81]: **Azzouz L. Benchaa B. El-Hadj. Kenaic S.** [Effect of sand type on fresh and hardened properties of self- compacting- concrete]. **2<sup>nd</sup>** International Sustainable Buildings Symposium... 28-30 may. **2015.**
- [82]: **Khatab E.** [Effects of incorporating dune sand as fine aggregate replacement in self-compacting concrete]. Key Engineering Materials ISSN: 1662-9795, Vol. 668, pp 189-196..Switzerland. **2015.**
- [83]: **Zeghichi L. BENGHAZI Z. Baali L.** [The effect of the kind of sands and additions on the mechanical behaviour of S.C.C]. Eighth International Conference on Material Sciences, CSM8-ISM5....Physics Procedia 55 p 485 – 492. **2014.**
- [84]: **Adekunle S, K. Ahmad S. Maslehuddin M.** [The effect of aggregate packing on the performance of SCC using dune sand]. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, Illinois, USA, May 12–15, **2013.**
- [85]: **Benmerioul F. Makani A. Tafraoui A. Zaouai S.** [ Valorization of the crushed dune sand in the formulation of self- compacting- concrete]. SCESCM 2016 . Procedia engineering (171) p 672 – 678. **2017.**
- [86]: **Makani A. Rennani F,Z. Tafraoui A. Benmerioul F. Zaoiai S.** [Valorization Of Sand Dune Of Taghit (South-Western Algeria) In The Construction: Technical And Eco-Environmental Aspect]. International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), Vol.8 pp. 10-12. **2019.**
- [87]: **Makani A. Benmerioul F. Zaoiai S. Tafraoui A.** [Effect of compositional parameter on mechanical properties of self-compacting concrete based of ground dune sand]. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, ISSN: 2394-2827 Volume-6, Issue-2, Apr. **2019.**
- [88]: **Rmili A. Ben Oueddou M. Added M. Ghorbel E.** [Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part II: SCC Fresh and Hardened States Characteristics]. International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.3, No.1, pp. 11~14, June. **2009.**
- [89]: **Mamirov M.** [Using theoretical and experimental particle packing for aggregate gradation optimization to reduce cement content in pavement concrete mixtures]. Master of Science Thesis .University of Nebraska-Lincoln, USA. **2019.**
- [90]: **Dia M.** [Traitement et Valorisation de Sédiments de Dragage Phosphatés en Technique Routière]. Thèse de doctorat. Université d'Artois. France, **2013.**
- [91]: **Alzieu C.** [Dragages et environnement marin Etat des connaissances].Ouvrage / Actes de colloque. France. **1999.**
- [92]: **Quideau.** [Chambre d'agriculture – Utilisation des vases de la Rance sur les terres agricoles]. Septembre. **2016.**

- [93]: **Banoune B. Melbouci B. Rosquoet F. Langlet T.** [ Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorization in road construction]. Bull Eng Geol Environ 75, 1505–1517. **2016.**
- [94]: **Nedloussi F, Benamara L . Ouhba K.** [Utilisation des sédiments d’envasement de barrages comme matières premières locales dans la production des briques]. Matériaux & Techniques Volume 107, Number 3. **2019.**
- [95]: **Benasla M. Hadjel M. Benamara L. Ouhba K.** [Caractérisation de sédiments du barrage de l’Oued Fodda et leur valorisation comme un ajout artificiel dans le ciment]. Matériaux & Techniques Volume 104, Number 3. **2016.**
- [96]: **Rozas F. Castillo A. Martínez I. Castellote M.** [ Guidelines for assessing the valorization of a waste into cementitious material: dredged sediment for production of self compacting concrete]. Materiales de Construcción 65 (319), July–September. **2015.**
- [97]: **Safi B. Ghernouti Y. Rabehi B. Aboutaleb D.** [Effect of the Heat Curing on Strength Development of Self-compacting Mortars Containing Calcined Silt of Dams and Ground Brick Waste]. Materials Research; 16(5): 1058-1064. **2013.**
- [98]: **Wang H-Y.** [Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt]. Construction and Building Materials. 23, 2332–2337. **2009.**
- [99]: **Nesmene M.** [Propriétés des bétons autoplaçants de haute performance préparés avec des granulats recyclés]. Mémoire de maîtrise. Université de sherbrooke, Canada, **2018.**
- [100]: **NF EN 12350-8.** [Essai pour béton frais – Partie 8 : béton autoplaçant – Essai d’étalement au cône d’Abrams]. (**2010**).
- [101]: **NF EN 12350-10.** [Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant – Essai à la boîte en L]. (**2010**).
- [102]: **NF EN 12350-11.** [Essai pour béton frais – Partie 11 : béton autoplaçant – Essai de stabilité au tamis]. (**2010**).
- [103]: **NF EN 12390-3.** [Essais pour béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes]. (2003).
- [104]: **NF EN 12390-5.** [Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion des éprouvettes]. (**2019**)
- [105]: **Xavier R.** [Caractérisation du comportement en traction du béton sous fortes sollicitations, Essais de flexion trois points aux barres de Hopkinson]. Thèse de doctorat. Université D’orléans, France. **2016.**
- [106]: **ASTM C267 - 01(2012).** [Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International, **2012.**
- [107]: **Samimi K, Kamali-Bernard S, & Maghsoudi A. A.** [Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment]. Construction and Building Materials, 165, 247–263. (**2018**).
- [108]: **Khelifa M R.** [Effet de l’attaque sulfatique sur la durabilité des bétons autoplaçant]. Thèse de doctorat. Université d’Orléans et de Constantine. **2009.**

- [109]: **ASTM C1202**. [Méthode d'essai standard pour l'indication électrique de la capacité du béton à résister à la pénétration des ions chlorure]. (2016). DOI : 10.1520/C1202-12.2.
- [110]: **Haddad K**. [Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages]. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2018.
- [111]: **Douara T-H, Guettala S**, [Effects of curing regimes on the physico-mechanical properties of self-compacting concrete made with ternary sands]. Construction and Building Materials 195, P 41–51, (2019).  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.043>
- [112]: **Lee E, Ko J, Yoo J, Park S, Nam J**. [Analysis of the Aggregate Effect on the Compressive Strength of Concrete Using Dune Sand]. Appl. Sci. (2021), 11, 1952.  
<https://doi.org/10.3390/app11041952>
- [113]: **GCI – 714**. [Cours : Durabilité et Réparations du Béton], Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet. 2009.
- [114]: **Kapoor K, Singh S. P, Singh B**. [Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures]. Construction and Building Materials, 128, 67–76. (2016).  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

## MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant  
Haut réducteur d'eau**

### DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

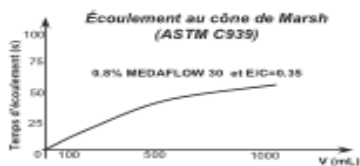
### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

### PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

- Sur béton frais :
  - Obtention d'un rapport E/C très faible
  - Amélioration considérable de la fluidité
  - Une très bonne maniabilité
  - Éviter la ségrégation
  - Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1,4%)	39,2	54,7	62,2

### CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Brun clair
- pH ..... 6 – 6,5
- Densité ..... 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore ..... < 0,1 g/l
- Extrait sec ..... 30%

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

### DOSAGE

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP65 Oued Smar – 16270 Alger  
 Tél: (213) 021 51 66 81 & 82  
 Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23  
 www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com





## FILLERS

### Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Seltas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine métrique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

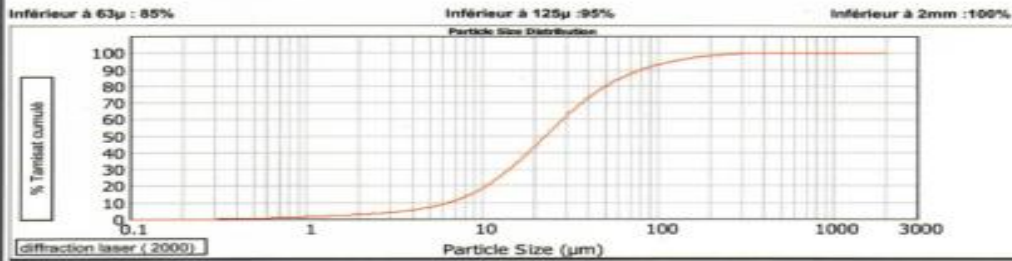
#### Caractéristiques chimiques

CaCO <sub>3</sub>	98%
CaO	56,03%
SiO <sub>2</sub>	0,04%
Na <sub>2</sub> O	0,05%
MgO	0,17%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02%
K <sub>2</sub> O	0,02%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,008%
TiO <sub>2</sub>	0,009%
Chlorure	0,0033%
SO <sub>2</sub> (soluble dans l'eau)	0,0021%
SO <sub>2</sub> (soluble dans l'acide)	0,19%
Soufre totale	0,0137%
Résidu insoluble	1,15%
Solubilité dans l'eau (Ws)	0,24%
Perte au feu	43%
Ph	9

#### Caractéristiques physiques

Masse volumique réelle:	2,7
Masse volumique en vrac	1,15gr/cm <sup>3</sup>
Valeur de bleu de méthylène MB <sub>1</sub>	1,67gr/kg

#### Répartition granulométrique



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

#### Conditionnement

Vrac  
Big Bag ( 1 tonne )

#### Principales utilisations

Ajout pour matériaux de construction  
Béton routé compacté ( B R C )



50kg

ماتين  
MATINE

ALGÉRIE



**Ciment portland au Calcaire**

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine  
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 - 2013) et Européenne (EN 197-1)

**AVANTAGES PRODUIT**

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.



**APPLICATIONS RECOMMANDÉES**

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



**FORMULATION CONSEILLÉE**

	Ciment (sacs)	Sable (sec) (m³)	Gravillons (sec) (m³)	Eau (litres)
Dosage pour béton C25/30	X 1	0,7	0,35	25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

**CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES**

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10,0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2,5±0,5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 0%
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	< 0,1

Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Valeur
C3S (%)	60±3
C2S (%)	8±2

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26,5±2,0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3,0

**CONSIGNES DE SÉCURITÉ**

- 1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.
- 2- MANUTENTION : Levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



Conditionnement:

**LAFARGE ALGÉRIE**  
Bureau n°02, 16ème étage, Tour Genève,  
Bo Pte maritima, Mohammadia, Alger.  
tél + 213 (0) 21 98 54 54  
Fax + 213 (0) 23 92 42 94  
www.lafargealgerie.com  
de.selectio@lafargealgerie.com  
Tel: 001 98 55 55

