

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté par :

**Aliouane abderrahmane
Kadir tarek**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil**

Thème :

**Etude de durabilité d'un béton autoplaçant à base des sédiments
de dragage**

Devant le jury composé de :

MOKEDDEM Youcef
LAOUCHEDI Dalila
HAMI Brahim

MCB
MCB
MCB

UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examineur

Année Universitaire 2022-2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier « Allah » le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nos grands remerciements s'adressent à notre vice doyen de faculté des sciences et sciences appliquées de pole universitaire de Bouira. On tient à remercier très chaleureusement notre chef département Mme S.Mohamadi qui nous a accompagnés avec sa confiance et gentillesse.

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier vivement notre promotrice Mme D.Laouchedi pour l'aide qu'il nous a fourni toute au long de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier Mrs les directeurs des laboratoires LCTP, LNHC pour leurs encadrements techniques et moraux qu'elles n'ont cessé d'apporter à nos personnes et qu'ils nous guident tout au cours de notre stage.

Sans oublier l'ensemble de professeures et personnel de département Génie Civil.

On remercié également les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail..

DEDICACE

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à nos chers parents; qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

Nous espérons qu'un jour, nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue vie.

Nous dédions aussi ce travail à nos frères et sœurs, nos familles, nos amis, tous nos professeurs qui nous ont enseigné et à tous ceux qui nous sont chers.

Résumé

L'utilisation des sédiments de dragage en vue de leur valorisation constitue une perspective encourageante dans le secteur du génie civil. Les mortiers et bétons autoplaçants bénéficient d'une amélioration de la durabilité grâce à l'utilisation de ces nouveaux liants. Dans ce contexte, ce projet vise à élaborer des bétons autoplaçants en remplaçant partiellement le ciment traditionnel par de la boue de dragage provenant du barrage de béni Amrane. L'étude vise principalement à évaluer comment cette boue calcinée affecte la durabilité d'un béton autoplaçants. Les conclusions de cette étude ouvrent des perspectives prometteuses pour l'amélioration des Bétons Autoplaçants (BAP) contenant de la vase calcinée. Les conclusions obtenues offrent des opportunités prometteuses pour l'amélioration des propriétés des bétons dans le secteur de la construction en adoptant une approche durable et efficace dans l'utilisation des sédiments de dragage.

Mots clé : béton autoplaçants, boue de dragage, la vase calcinée, la durabilité.

Abstract

The use of dredged sediments for their valorization presents an encouraging perspective in the field of civil engineering. More precisely, it is possible to use these particle deposits as raw resources to produce innovative binders for industrial purposes. Self-compacting mortars and concretes benefit from improved durability through the use of these new binders. In this context, this project aims to develop self-compacting concrete by partially replacing traditional cement with dredged sludge from the Beni Amrane dam. The study primarily aims to evaluate how this calcined sludge affects the durability of self-compacting concrete. The findings of this study open promising prospects for enhancing Self-Compacting Concretes (SCC) containing calcined mud. The conclusions obtained offer promising opportunities for improving concrete properties in the construction sector by adopting a sustainable and efficient approach in the use of dredged sediments.

Keywords: self-compacting concrete, dredged mud, calcined silt, durability.

المخلص

استخدام رسوبات الحفر بهدف استغلالها يمثل توجهاً مشجعاً في قطاع الهندسة المدنية. على وجه الدقة، يمكن استخدام هذه الرواسب الجزيئية كموارد أساسية لإنتاج مواد رابطة مبتكرة لأغراض صناعية. تستفيد الخرسانات ذاتية التسوية من تحسين في المتانة بفضل استخدام هذه المواد الرابطة الجديدة. في هذا السياق، يهدف هذا المشروع إلى تطوير ملاط ذاتي التسوية وخرسانة ذاتية التسوية عن طريق استبدال جزء من الأسمنت التقليدي بواسطة الطين المعالج حرارياً الناتج من سد بني عمران. تهدف الدراسة في المقام الأول إلى تقييم كيفية تأثير هذا الطين المكلس على متانة الخرسانة ذاتية التسوية. تفتح التي تحتوي على الوحل المسحوب . (BAP) استنتاجات هذه الدراسة آفاقاً مشجعة لتحسين خواص الخرسانة ذاتية التسوية تقدم الاستنتاجات المستخلصة فرصاً مشجعة لتحسين خصائص الخرسانة في قطاع البناء من خلال تبني نهج مستدام وفعال في استخدام رسوبات الحفر.

كلمات مفتاحية : الخرسانة ذاتية الضغط، الطين المعالج حرارياً، الوحل المسحوب من السدود، المتانة.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les bétons autoplaçants

I.1. introduction 4

I.2. notion du beton autoplaçant 5

I.3 caractérisation des BAP a l'état frais 6

I.3.1 Essai d'étalement (Slump flow) 6

I.3.2 Essai J-Ring (Essai des anneaux japonais) 7

I.3.3 Essai de la boîte en L 7

I.3.4 Essai de stabilité au tamis 8

I.3.5 Essai V funnel 10

I.3.6 Essai de ressuage 10

I.4. méthodes de formulation des BAP 11

I.4.1. Volume de gravillon 12

I.4.2. L'emploi de superplastifiants 12

I.4.3. Une quantité d'addition ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante 13

I.4.4. influence des additions minérales sur les propriétés des BAP 14

I.4.4. conclusion 15

Chapitre II : Durabilité des bétons autoplaçants

I.1. introduction 17

I.2. Facteurs influençant la durabilité 19

I.3. les attaques chimiques des bétons 19

I.3.1. Actions des sulfates 19

I.3.1.a. Sources des sulfate.....	20
I.3.1.b Mécanisme d'actions des sulfates.....	20
I.3.2. Actions des acides.....	21
I.4.conclusion.....	23

Chapitre III : La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants

III.1. Introduction.....	25
III.2. phénomène de l'envasement.....	25
III.2.1. L'envasement des barrages en Algérie.....	26
III.2.2 Les sédiments de dragage.....	28
III.2.2.1. Définition et origine.....	28
III.2.2.2. les constitutions des sédiments.....	28
III.2.2.3. La valorisation des sédiments de dragage dans les BAP.....	30
III.2.2.3.a.Les Avantages de La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants.....	31
III.2.2.3.b.Les Défis de La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants.....	31
Conclusion.....	31

Chapitre IV : partie pratique

IV.1. Introduction.....	34
IV.2. Les matériaux utilisés.....	34
IV.2.1. Le ciment.....	34
IV.2.1.a. Caractérisations de ciment.....	34
IV.2.2. La vase.....	36
IV.2.2.a Caractérisations de la vase.....	37
IV.2.3. Les granulats.....	38
IV.4. Formulation d'un béton autoplaçant.....	43
IV.4.2. Les dosages des constituants.....	43
IV.4.3 Protocole de malaxage de béton.....	43

IV.5. Caractérisation à l'état frais de BAP.....	43
IV.5.1 L'essai d'étalement.....	43
IV.5.2. L'essai de boit en L.....	44
IV.5.3. Stabilité au tamis.....	45
IV.6. Caractérisation à l'état durci.....	46
IV.6.1 L'essai de compression.....	46
IV.6.2 Les essais de la durabilité.....	49
IV.6.2.1. L'essai d'absorption.....	49
IV.6.2.2. L'attaque par les chlorures.....	52
IV.6.2.3. L'attaque par les sulfates.....	56
Conclusion générale.....	62

Liste des tableaux

Tableau III. 1 : taux d'envasement en 1986 ET 2004.....	27
Tableau IV. 1 : caractéristiques chimiques du CEMI 42,5 ES M'SSILA.....	34
Tableau IV. 2 : Les caractéristiques minéralogiques de CEMI 42,5 ES M'SSILA.....	35
Tableau IV. 3 : Les caractéristiques Physiques de CEMI I 42,5 ES M'SSILA.....	35
Tableau IV. 4: Les caractéristiques mécanique de CEMI42,5 ES M'SSILA.....	36
Tableau IV. 5 : Analyse chimique élémentaires effectuées par « Fluorescence X ».....	37
Tableau IV. 6 : les caractéristiques physiques de la vase.....	37
Tableau IV. 7 : les caractéristiques physiques de sable.....	38
Tableau.IV.8 : Les résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	38
Tableau.IV.9 : la caractérisation physique de gravier.....	39
Tableau.IV.10 : coefficient d'aplatissement de 3/8.....	40
Tableau.IV.11 : coefficient d'aplatissement de 8/15.....	40
Tableau.IV.12 : coefficient los angles.....	41

Tableau.IV.13 : analyse granulométrique de gravier 3/8.....	41
Tableau.IV.14 : analyse granulométrique de gravier 8/15.....	42
Tableau.IV.15 : les dosages des constituants pour 1m3.....	43
Tableau.IV.16 : résultat de l'essai d'étalement.....	44
Tableau.IV.17 : résultat de l'essai de boit en L.....	44
Tableau.IV.18 : résultat de l'essai de stabilité au tamis.....	45

Liste des figures

Figure I.1 : Essai d'étalement au cône (slump flow).....	6
Figure I-2 : J-Ring (Anneau Japonais).....	7
Figure I.3 : Essai de la boîte en L.....	8
Figure I.4 : l'essai de stabilité au tamis.....	9
Figure I.5 : L'essai V-funnel.....	10
Figure I.6 : Action des superplastifiants.....	13
Figure I.7 : Influence de la quantité de superplastifiant sur L'étalement et la viscosité d'un béton.....	13
Figure III. 1 : Evolution dans le temps de l'envasement des barrages Algérie.....	27
Figure III. 2 : Vue schématique sur les formes de l'eau dans le sol (Marot, 1997).....	29
Figure IV. 1 : courbe d'analyse granulométrique.....	39
Figure. IV. 2 : courbe d'analyse granulométrique de gravier 3/8et 8/15.....	42
Figure. IV. 3 : les résultats de l'essai d'étalement de BAP.....	44
Figure. IV. 4 : les résultats de boit en L.....	45
Figure. IV. 5 : résultat de l'essai de stabilité au tamis.....	45
Figure. IV. 6 : éprouvette prêt à compression sur un balance précise.....	48
Figure. IV. 7 : éprouvette dans la presse après la compression.....	48
Figure. IV. 8 : les résultats de compression.....	49
Figure. IV. 9 : coupage des éprouvettes.....	50

Figure. IV. 10 : les résultats de l'essai d'absorption.....	50
Figure. IV. 11 : la machine utilise pour le carottage des éprouvettes.....	51
Figure. IV. 12 : les éprouvettes après le carottage.....	51
Figure. IV. 13 : les solutions de HCL et H_2SO_4 dans les flacons.....	52
Figure. IV. 14 : les éprouvettes dans l'étuve pendant 24h.....	53
Figure. IV. 15 : perte de masse du béton témoin immergé dans la solution HCL.....	53
Figure. IV. 16 : éprouvette du béton témoin immergé dans HCL.....	54
Figure. IV. 17 : Perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution HCL.....	54
Figure. IV. 18 : éprouvette du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution HCL.....	54
Figure. IV. 19 : Perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau immergé dans la solution HCL.....	55
Figure. IV. 20 : éprouvettes du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau immergé dans la solution HCL.....	55
Figure. IV. 21 : Histogramme comparatif de la perte de masse en fonction d'âge des bétons immergés dans la solution HCL.....	56
Figure. IV. 22 : Perte de masse du béton témoin immergé dans la solution H_2SO_4	57
Figure. IV. 23: éprouvettes du béton témoin immergé dans la solution H_2SO_4	57
Figure. IV. 24 : perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution H_2SO_4	58
Figure. IV. 25 : éprouvette du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution H_2SO_4	58
Figure. IV. 26 : perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau immergé dans la solution H_2SO_4	59
Figure. IV. 27 : éprouvette du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution H_2SO_4	59
Figure. IV.28 : Histogramme comparatif de la perte de masse en fonction d'âge des bétons immergés dans la solution H_2SO_4	60

Introduction générale

Introduction générale

L'un des challenges insidieux auxquels les barrages du monde entier sont confrontés est la sédimentation, également connue sous le nom de "l'ennemi silencieux" par les experts. Selon les données de la Banque mondiale, cette menace engendre chaque année des pertes financières qui équivalent approximativement à 1% du coût total de l'investissement dans ces ouvrages. En effet, toutes les recherches ont démontré que ce phénomène provoque l'accumulation d'environ 4,5 milliards de mètres cubes de sédiments, réduisant ainsi la capacité de stockage des barrages d'environ 11%. Cependant, il convient de noter que cette problématique est encore plus préoccupante dans le cas des barrages situés en Algérie [1].

En Algérie, les considérations concernant les processus de dragage sont principalement axées sur les dépenses associées à ces activités, bien qu'elles restent essentielles. Cependant, cette approche n'échappe pas à la difficulté potentielle de gérer adéquatement les volumes de sédiments extraits. Cette même problématique a été le catalyseur d'une politique de valorisation qui vise certainement à atténuer les charges liées à l'opération de dragage tout en préservant l'environnement.

La corrélation entre la croissance de l'importance du dévasement et l'attention que la recherche accorde aux bétons autoplaçants met en lumière la notion de valorisation des sédiments dragués après leur traitement, en vue de les incorporer dans la composition des BAP. Cette approche semble prometteuse, étant donné l'intérêt réciproque lié aux avantages mutuels.

Certainement, la technologie des bétons autoplaçants a la capacité d'utiliser des quantités considérables de sédiments, ce qui pourrait potentiellement contribuer à améliorer les propriétés et les performances de ce genre de béton.

La description des propriétés physico-chimiques et minéralogiques de la partie solide des sédiments prélevés du réservoir de BENI AMRANE a renforcé la légitimité de son utilisation en tant que ressource potentielle pour le domaine du génie civil.

C'est pour cette raison que nous avons initié cette recherche dans l'objectif de contribuer aux aspects écologiques et techniques en considérant la vase traitée thermiquement comme une alternative partielle au ciment dans la construction. Cela implique d'examiner comment la présence de la vase affecte les propriétés physiques, mécaniques, et la durabilité des Bétons Autoplaçants (BAP)

Introduction générale

L'action menée dans cette synthèse bibliographique est de répertorier les documents existants qui touchaient de près ou de loin aux BAP ainsi qu'à leurs propriétés. Le premier chapitre présente des généralités sur les BAP.

Le deuxième chapitre présente la durabilité des bétons

Le troisième chapitre présente la valorisation de la vase dans les BAP.

Le quatrième chapitre présente la partie pratique et les résultats .Enfin une conclusion générale clôture notre travail

Chapitre I : Généralités sur les bétons autoplaçants

I.1. Introduction

Le béton autoplaçant, connu sous l'acronyme BAP ou SCC en anglais (pour self-compacting concrete), est par essence un matériau de construction hautement fluide, uniforme et stable. Il se distingue par sa capacité à s'auto-compacter rapidement grâce à son propre poids, sans nécessiter l'utilisation de vibrations externes ou internes.

En réalité, les bétons conventionnels connaissent une diminution de leur facilité de manipulation lors du transport et de la mise en place, ce qui généralement nécessite l'apport d'une certaine quantité d'énergie (sous forme de vibration, qu'elle soit interne ou externe) pour éliminer les poches d'air emprisonnées dans le matériau. Il est à noter que dans certaines situations, les bétons d'une consistance fluide peuvent être mis en œuvre sans recourir à la vibration, cependant, dans de tels cas, les réglementations tiennent compte d'une éventuelle diminution de la qualité du matériau une fois durci [2].

Les BAP ont fait leur apparition au Japon à la fin des années 1980 dans le but d'améliorer l'efficacité de la construction. Ils visaient à garantir une mise en place précise du béton de haute qualité, indépendamment du niveau de compétence des travailleurs, à réduire les nuisances sonores en milieu urbain et à permettre le bétonnage dans des zones fortement armées, de géométrie complexe ou difficilement accessibles. En effet, il était possible de minimiser le risque de blocage en optimisant les mélanges pour obtenir la viscosité appropriée. Cette optimisation pouvait être réalisée en réduisant le rapport eau/ciment (E/C) et/ou en ajoutant la quantité appropriée de superplastifiant.

D'après les écrits de Khayat en 1999, le Béton Auto-Plaçant (BAP) doit trouver un équilibre délicat entre deux caractéristiques complètement opposées : une excellente fluidité et une grande stabilité. Cette particularité est ce qui réellement distingue les BAP des bétons fluides conventionnels.

De plus, les bénéfices associés aux BAP sont suffisamment convaincants pour soutenir leur adoption [2] :

- Suppression de la nécessité de recourir aux vibrations et de réduire les perturbations sonores..
- Diminution de la durée de travail.

- Renforcement résultant de la stabilité accrue de la matrice, de l'amélioration de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats ou les armatures ;
- Optimisation de l'adhérence entre un béton existant et le Béton Auto-Plaçant (BAP) utilisé pour la réparation, visant à améliorer la qualité.
- Suite à la suppression des couches de béton dégradé de l'élément structural, qui ont été remplacées par une couche de béton autonivelant pour réparation, on peut constater une réduction de la perméabilité, entraînant ainsi une amélioration de la durabilité de cet élément structural..
- Modifications apportées aux instruments de production (outils de configuration).
- L'utilisation de BAP entraîne une nette amélioration de la qualité des revêtements.

Cependant, en dépit de leurs aspects attrayants, notamment lorsqu'ils sont fraîchement préparés, et de leur adoption croissante dans d'autres pays du monde, les Bétons Autoplaçants (BAP) ne sont pas encore largement acceptés et adoptés par l'ensemble des parties prenantes, ce qui limite leur diffusion en Algérie. Il est crucial d'acquérir une expérience pratique de leur utilisation, similaire à celle dont bénéficient actuellement les Bétons Vibrés (BV), afin de mieux comprendre leur comportement à long terme, qu'il s'agisse de leurs propriétés mécaniques ou d'autres caractéristiques. De plus, compte tenu de l'impératif actuel de trouver des solutions techniques conformes au développement durable, il est essentiel d'examiner la question du vieillissement des BAP.

I.2. Notion du béton autoplaçant

Le béton autoplaçant (BAP) est un type de béton innovant qui possède la capacité de se propager et de se mettre en place de manière autonome, sans nécessiter de vibration externe. Contrairement au béton traditionnel, le BAP est très fluide et présente une excellente capacité d'écoulement, ce qui lui permet de remplir les moules et de s'adapter aux formes complexes sans l'aide de techniques de compactage mécanique.

Le principal avantage du BAP est qu'il facilite considérablement la mise en œuvre du béton, réduisant ainsi la main-d'œuvre et les coûts associés à la construction. Il permet également d'améliorer la qualité de la finition des surfaces, d'atteindre une meilleure compacité et une plus grande durabilité du béton.

Le développement du BAP repose sur l'utilisation d'adjuvants spécifiques, tels que les superplastifiants et les stabilisateurs de viscosité, qui modifient les propriétés rhéologiques du mélange de béton. Ces adjuvants permettent d'obtenir une viscosité optimale, une meilleure

dispersion des particules et une bonne séparation de phase entre les granulats et la pâte de ciment.

Il convient de noter que le concept de BAP a été introduit pour la première fois au Japon dans les années 1980. Depuis lors, il a été largement adopté dans le domaine de la construction dans de nombreux pays à travers le monde. De nombreuses recherches et études ont été menées pour améliorer les propriétés du BAP, optimiser sa composition et évaluer ses performances dans différents contextes[3]

I.3 caractérisation des BAP a l'état frais

Les bétons autoplaçants, qui sont des bétons extrêmement fluides, uniformes et stables, peuvent être mis en place dans des structures complexes et fortement armées sans nécessiter de vibration. Ils présentent des propriétés et des comportements à l'état frais qui se distinguent de ceux d'un béton ordinaire vibré (BOV). Leur maniabilité peut être classiquement décomposée en trois aspects : leur capacité à se déplacer dans un espace non restreint, leur aptitude à conserver leur mobilité dans des espaces confinés, et leur stabilité en ce qui concerne la prévention de la ségrégation et du ressuage. La caractérisation de ces types de bétons est donc plus complexe que celle des bétons conventionnels, ce qui nécessite la réalisation d'essais spécifiques.

L'Association Française de Génie Civil (AFGC) en 2000 a émis des directives concernant la caractérisation. À l'origine temporaires, ces directives sont aujourd'hui largement utilisées sur le terrain comme des tests standard pour évaluer la formulation du Béton Autoplaçant (BAP) [4].

I.3.1 Essai d'étalement (Slump flow)

L'essai d'étalement est le plus fréquemment utilisé car il est le plus facile à mettre en pratique pour évaluer la mobilité du béton dans un environnement ouvert. Il s'agit d'une méthode utilisée pour mesurer la fluidité du béton. Cette méthode Il s'agit d'une version modifiée de l'essai de détermination de l'affaissement utilisant la méthode du cône d'Abrams, dans laquelle on mesure La mesure du diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés qui sont mutuellement perpendiculaires. en utilisant le même équipement. Les valeurs obtenues sont enregistrées en millimètres. (Figure I.1).

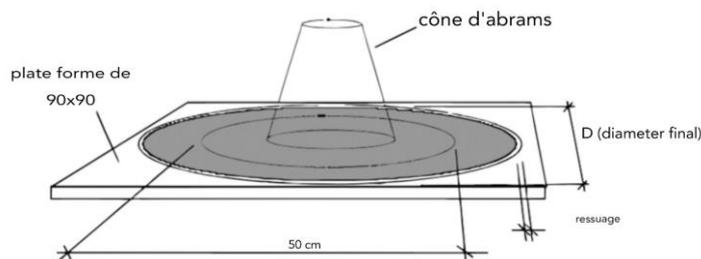


Figure I.1 : Essai d'étalement au cône (slump flow)

En général, lors de la réalisation de l'essai, les valeurs d'étalement sont généralement maintenues dans une plage de 60 à 75 cm, sans présence de laitance ou d'accumulation de gros granulats au centre. [5].

La vitesse de dispersion du béton est également une mesure fréquemment considérée, avec un exemple donné en référence au temps nécessaire pour atteindre un disque de 50 cm de diamètre.

I.3.2 Essai J-Ring (Essai des anneaux japonais)

L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité du béton à s'écouler à travers des barres d'armature en déterminant son potentiel de blocage. Le béton est libéré à partir d'un cône positionné au cœur d'un cercle en métal. Permettant ainsi d'effectuer cette évaluation. (Figure I.2). Ainsi, la ségrégation et l'enrobage des armatures sont des traits distinctifs à prendre en compte. Parallèlement, il est essentiel d'assurer une répartition uniforme des granulats.

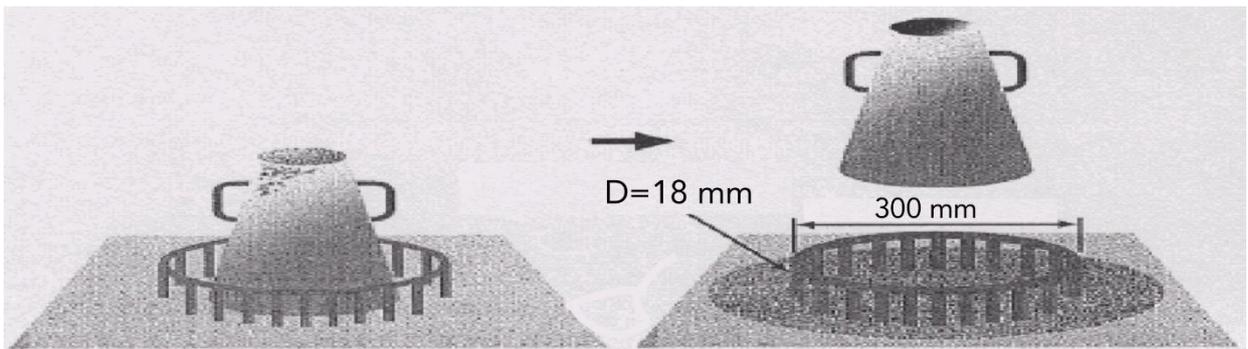


Figure I-2 : J-Ring (Anneau Japonais)

Sur une plaque plane, un cône est positionné au centre. Autour de ce cône, il y a un anneau de 300 mm de diamètre. L'anneau est composé d'un total de 6 barres en acier de diamètre 16 mm (voir figure I-2). Une fois que le cône est rempli de béton, il est soulevé, permettant ainsi au béton de s'écouler à travers les barres en acier. À la fin de l'expérience, le diamètre de la galette formée est mesuré. D'autres mesures peuvent être prises lors de cette expérience, telles que le temps que met le béton pour dépasser un diamètre de 500 mm (T50) en secondes, ainsi que la différence d'épaisseur entre la galette à l'intérieur de l'anneau et à l'extérieur de celui-ci. [6].

I.3.3 Essai de la boîte en L

Le but de cet essai consiste à évaluer la capacité du béton à se déplacer dans des espaces restreints et à s'assurer qu'il ne rencontrera pas de problèmes de blocage autour des armatures lors de sa mise en place. Les détails du dispositif utilisé pour cet essai, ainsi que le principe de fonctionnement, sont présentés dans la Figure I.3.

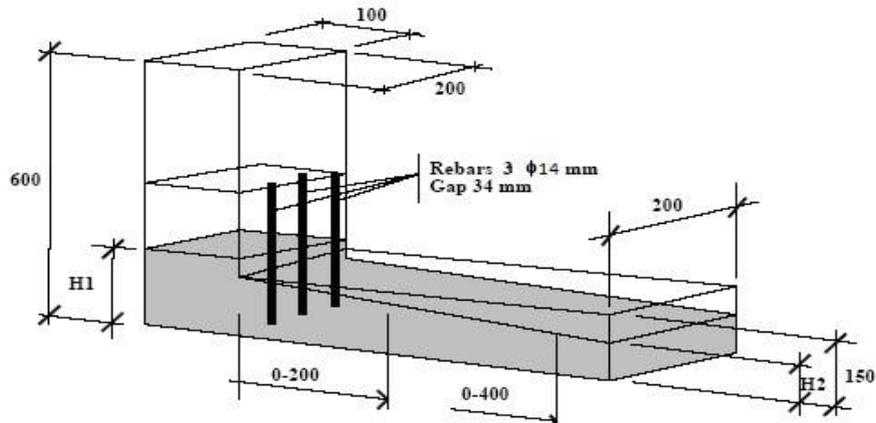


Figure I.3 : Essai de la boîte en L

La section verticale de la boîte s'étend vers le haut, comblée de béton jusqu'à son niveau maximal, nécessitant environ 13 litres de volume. Une fois rempli, le béton est laissé en repos pendant une durée d'une minute. Ensuite, en ouvrant la trappe, le béton s'écoule à travers un treillis métallique standard, conçu pour les structures comportant un important renforcement, bien qu'il puisse éventuellement être moins dense (avec un espace libre de 34 mm entre deux barres). [6].

Après la fin du processus d'écoulement, les hauteurs H1 et H2 sont mesurées et le résultat est exprimé sous forme de rapport de remplissage $H2/H1$. Pour un BAP, le rapport de remplissage doit être supérieur à 0.8.

Si le béton rencontre des difficultés à circuler à travers le treillis métallique ou s'il y a une obstruction des granulats, cela indique que la ségrégation se manifeste.

Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

I.3.4 Essai de stabilité au tamis

Connue également sous le nom d'essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, cette méthode a pour objectif de déterminer la propension à la ségrégation des bétons autoplaçants. Elle peut être employée lors de la phase de recherche et de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ainsi que pour vérifier la stabilité du béton livré sur le chantier lors de sa réception. [8]

La ségrégation survient lorsque les composants d'un matériau hétérogène se séparent et ne sont plus uniformément répartis. Dans le cas du béton, les différences de taille des granulats et de masse volumique de ses constituants sont les principales causes de la ségrégation. Ainsi, il est possible de contrôler les risques de ségrégation en choisissant une granulométrie appropriée et en prenant des précautions Lors de la phase d'installation du

béton, la consistance de la pâte de ciment joue un rôle essentiel en équilibrant le déplacement des éléments plus gros vers le bas. Par conséquent, les bétons ayant un faible rapport eau-ciment sont moins susceptibles de subir une ségrégation. [9].

On distingue Il existe deux manifestations de ségrégation. Dans la première variation, les composants volumineux ont tendance à se séparer en raison de leur vitesse de déplacement ou de leur capacité à se compacter plus rapidement que les particules fines. La deuxième forme de ségrégation se produit principalement dans les bétons fluides et se caractérise par la séparation de la pâte (ciment et eau) du mélange. Bien que l'ajout d'eau améliore la cohésion du béton, une consistance trop fluide peut entraîner l'apparition du deuxième type de ségrégation. [9].

Le test de stabilité au tamis est un complément aux tests qui évaluent la mobilité du béton, qu'il soit en milieu confiné ou non, en caractérisant sa stabilité. Il s'agit d'évaluer le pourcentage en masse de laitance (désigné par PLAITANCE) d'un échantillon de béton pesant $4,8 \pm 0,2$ kg, qui passe à travers un tamis de 5 mm (voir figure I.4). [9].

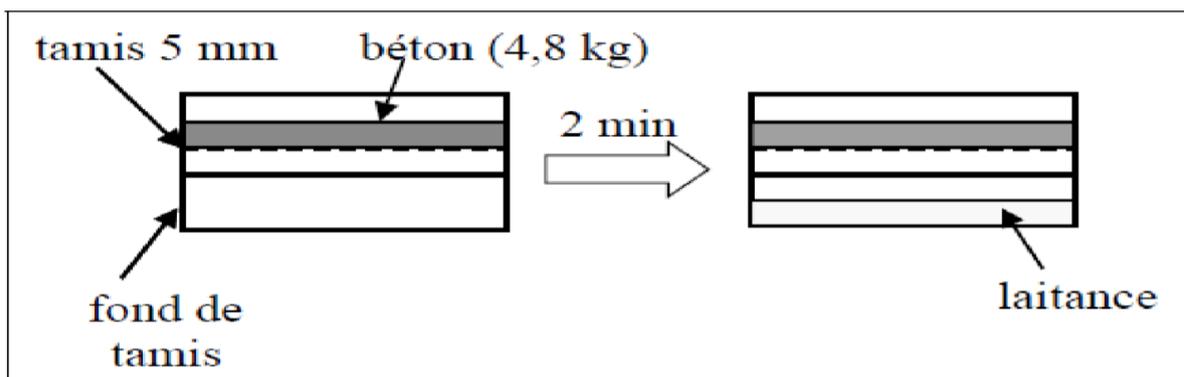


Figure I.4 : l'essai de stabilité au tamis

Les critères de conformité pour la formulation d'un béton autonivelant sont répartis en trois catégories [6] :

- ❖ $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$: Niveau de stabilité adéquat,
- ❖ $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$: Située à un point crucial de la stabilité, cette phase de test de séparation doit être effectuée sur le terrain,
- ❖ $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$: La stabilité est extrêmement précaire en raison de la ségrégation systématique et de l'utilisation excessive de béton inutilisable

Les bétons de granulats de pierre (BAP) présentent différents niveaux de ségrégation et de ressuage, en fonction du rapport E/C (eau/ciment) utilisé. Les rapports E/C de 0,4 et 0,5 donnent des BAP avec un taux de ségrégation inférieur à 15% et un ressuage limité à 3 ‰, ce qui

indique une stabilité acceptable. En revanche, les BAP avec un rapport E/C de 0,6 ont une stabilité médiocre lorsqu'ils sont soumis à un écoulement, ce qui est logique car ils contiennent une plus grande quantité d'eau. Des recherches ont montré que le ressuage diminue lorsque la teneur en fines dans le mélange augmente ($\geq 20\%$), probablement parce que les particules fines s'hydratent plus rapidement et ont une sédimentation plus lente. Par conséquent, les BAP comportant une proportion élevée de fines sont moins susceptibles de présenter des problèmes de ressuage. [6].

I.3.5 Essai V funnel

Une autre expérience vise à évaluer la fluidité du béton dans un environnement non restreint, similaire à celui d'un entonnoir en forme de V (V funnel) (voir Figure I.5).

Le test d'étalement est habituellement associé au seuil d'écoulement du matériau, tandis que le test V funnel est lié à sa viscosité, bien que le seuil d'écoulement soit également pris en compte aux parois de l'appareil. Néanmoins, se fier uniquement aux résultats de ces tests empiriques n'est pas adéquat pour décrire correctement le comportement du béton. [10]

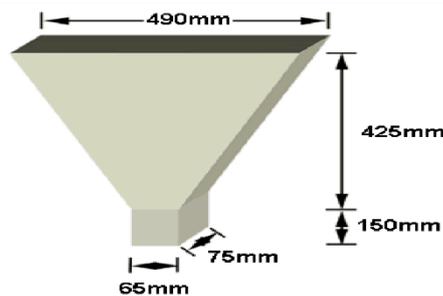


Figure I.5 : L'essai V-funnel [9]

I.3.6 Essai de ressuage

Le ressuage est un phénomène de ségrégation particulier dans lequel les particules solides se déplacent en sens inverse du liquide. Pendant la phase de repos du béton, les particules solides plus lourdes que l'eau se déposent au fond. Dans le cas des coffrages imperméables, cela entraîne la migration de l'eau vers le haut.

D'un point de vue visuel, le ressuage se manifeste par une fine couche d'eau présente à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, il se produit une compétition entre le débit d'eau qui s'écoule et le débit d'eau qui s'évapore. Si le débit d'évaporation est inférieur, le phénomène de ressuage devient visible, sinon la surface du béton perd son éclat et devient mate. Quelle que soit la situation, la quantité d'eau ressuée est égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle qui s'est déjà évaporée. [11].

La propension au ressuage est largement influencée par les caractéristiques du ciment. L'augmentation de la finesse du ciment réduit le phénomène de ressuage, probablement en raison de l'hydratation plus rapide des particules fines et de leur taux de sédimentation plus bas.

Le ressuage est fortement influencé par différentes caractéristiques du ciment. Par exemple, la présence d'une grande quantité d'alcalis, une teneur élevée en C3A ou l'ajout de chlorure de calcium ont un effet significatif sur la réduction du phénomène de ressuage. [12].

Cependant, il existe d'autres éléments à prendre en compte pour comprendre l'effet de l'évaporation de l'eau sur le béton, en plus des propriétés du ciment. La proportion d'éléments très fins (inférieurs à 150 μm) joue un rôle crucial dans la réduction du phénomène de ressuage. En réalité, lorsque les granulats fins concassés contiennent une quantité significative de matériaux très fins (plus de 15% passant au tamis de 150 μm), le ressuage est réduit. Cependant, il est important que ces matériaux très fins soient composés uniquement de poussière de concassage et non de particules d'argile. [12].

L'incorporation de cendres volantes ou de fumée de silice dans le mortier entraîne une diminution considérable du phénomène de ressuage. [13].

Toutefois, lorsque les températures sont extrêmement basses, il est possible que le ressuage augmente, vraisemblablement en raison d'un temps de développement accru du phénomène, dû au ralentissement de la réaction d'hydratation. [12].

En règle générale, l'utilisation de superplastifiants permet de réduire le phénomène de ressuage, à l'exception des situations où l'étalement est extrêmement élevé. Toutefois, lorsqu'ils sont combinés avec un retardateur, on peut constater une augmentation du ressuage en raison du temps supplémentaire accordé au développement de ce phénomène, dû au retard de prise. [12].

Une concentration excessive de ressuage peut causer une détérioration de l'aspect esthétique des revêtements et de leur durabilité. Il est recommandé de maintenir la limite de concentration de ressuage en dessous ou égale à 3 ‰ en volume pour préserver la qualité. [14].

I.4. Méthodes de formulation des BAP

Au cours de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons souligné comment les différents composants influencent les résultats et établi des critères pour atteindre les propriétés souhaitées. Les plages de valeurs couramment utilisées sont basées sur les recommandations les dispositions temporaires établies par l'Association française des gestionnaires de contenu (AFGC)."et sont présentées ci-dessous. [15] :

- ❖ une quantité de pâte élevée (ciment + additions + eau efficace) (40% du volume total)
- ❖ une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m³)
- ❖ utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation)
- ❖ un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1)
- ❖ un diamètre maximal réduit
- ❖ éventuellement utilisation d'un agent viscosant.

I.4.1. Volume de gravillon

L'utilisation de granulats roulés ou concassés dans les BAP peut être effectuée, mais leur volume doit être limité en raison du risque de blocage du béton dans les zones confinées. Cependant, ces granulats améliorent la compacité de la structure granulaire du béton, ce qui permet de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir une bonne maniabilité et une résistance souhaitée. [16].

En général, ces deux éléments entraînent l'utilisation d'un rapport gravillon/sable (G/S) d'environ 1 pour les BAP, mais ce ratio peut être ajusté en fonction du confinement de la structure étudiée.

Pour réduire le risque de blocage d'un confinement donné, il est courant de limiter le diamètre maximal des gravillons (DMAX) utilisés dans un BAP entre 10 et 20 mm. Cette restriction entraîne une diminution du volume de gravillon. [17].

I.4.2.L'emploi de superplastifiants

Les superplastifiants se composent de polymères organiques qui présentent une solubilité dans l'eau qui est obtenus en utilisant une procédure complexe de réaction de polymérisation. Cette synthèse génère de longues chaînes de molécules avec des masses moléculaires élevées, ce qui les rend relativement coûteux.

Les superplastifiants ont la capacité de disperser les particules de ciment, favorisant ainsi leur séparation en agissant de deux manières. D'une part, ils neutralisent les charges électriques présentes à la surface des grains par répulsion électrostatique. D'autre part, grâce à leurs chaînes moléculaires très longues, ils écartent les grains les uns des autres par répulsion stérique. Cela libère l'eau initialement piégée entre les floccs, la rendant disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (voir Figure I.6).

Ainsi, il devient possible de fabriquer des bétons très fluides même avec moins d'eau que celle nécessaire pour l'hydratation du ciment. De cette manière, il est possible de produire des bétons à faible rapport E/C, qui sont faciles à mettre en place. [18].

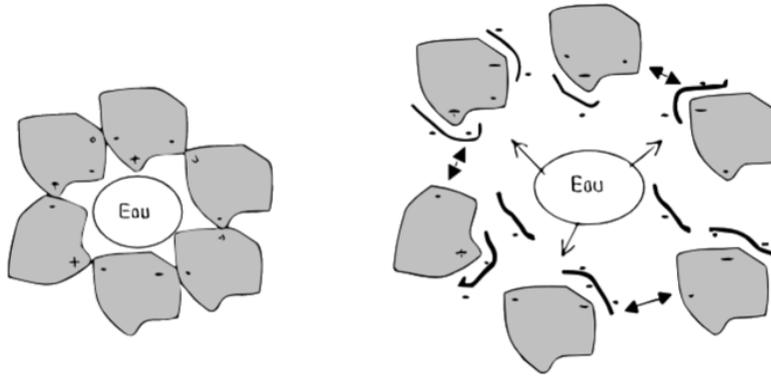


Figure I.6 : Action des superplastifiants

L'utilisation d'un superplastifiant permet d'accroître considérablement la fluidité des Bétons Auto-Plaçants, tant en termes de facilité de répartition que de résistance à l'écoulement. (Figure I.10).

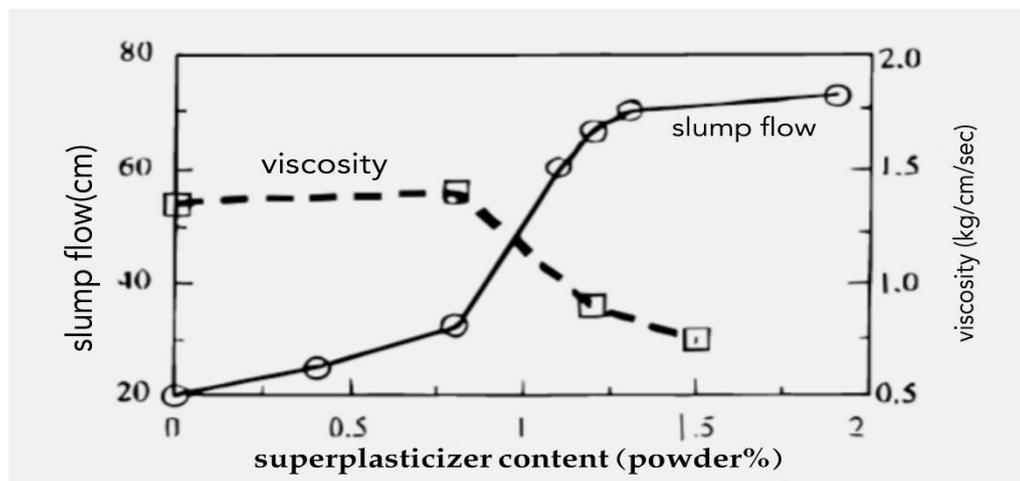


Figure I.7 : Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton

I.4.3. Une quantité d'addition ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante

Afin de réduire les risques de ressuage et de ségrégation, les mélanges du BAP contiennent généralement une quantité importante de fines, environ 500 kg/m^3 . Cependant, pour éviter des chaleurs d'hydratation excessives et des coûts de formulation élevés, le liant est souvent composé d'un mélange de deux ou trois constituants.

L'ajout de minéraux entraîne des changements dans la porosité de la structure du ciment, ce qui impacte les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. [20].

Diverses méthodes de formulation des BAP ont été développées à travers le globe (notamment l'approche japonaise, l'approche suédoise, l'approche du LCPC, etc.) afin de satisfaire les critères de mise en œuvre spécifiques à ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première catégorie concerne des compositions de béton comportant une forte concentration de ciment et une faible proportion d'eau. Une quantité substantielle de ciment (entre 450 et 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter la quantité de pâte, améliorant ainsi la flexibilité du mortier. Cependant, cette importante quantité de pâte limite les interactions entre les granulats (dont la quantité est également réduite), et l'ajout d'additifs tels que les superplastifiants et les agents de viscosité est utilisé pour réguler la fluidité et la viscosité. Malgré ses avantages en termes de performances mécaniques, cette méthode de formulation s'avère coûteuse et peu adaptée à des projets de construction standard [21].
- Une alternative dans la formulation repose sur l'introduction de fines minérales en remplacement d'une portion du ciment. Ces additifs, tels que les fillers calcaires par exemple, ont pour effet de créer une structure granulaire plus dense et uniforme. Cela réduit la quantité d'adjuvant nécessaire pour atteindre une consistance fluide et une viscosité spécifiques. De plus, leur utilisation permet de maintenir des niveaux de résistance mécanique adéquats ainsi qu'une modération des élévations de température liées à l'hydratation [22]. "Les auteurs conviennent qu'il n'y a pas de méthode de formulation universelle en raison des variations régionales ou nationales des matériaux utilisés et de leurs caractéristiques.

I.4.4. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP

Les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) peuvent être affectées de différentes manières par l'ajout de minéraux. Voici quelques exemples courants de ces influences, accompagnés de références pour une étude plus approfondie :

1. Influences sur la rhéologie :

L'ajout (par exemple, des poly carboxylates) peut améliorer la fluidité et l'aptitude à l'écoulement du BAP[23].

Les fillers minéraux (par exemple, les fillers calcaires) peuvent modifier la viscosité et la stabilité de l'écoulement du BAP[23].

2. Influences sur les propriétés mécaniques :

L'ajout de fines particules minérales (par exemple, de la poussière de silice) peut améliorer la résistance à la compression et la durabilité du BAP[23].

Les fillers minéraux peuvent influencer la porosité et la perméabilité du BAP, affectant ainsi sa résistance à la pénétration d'agents agressifs[23].

3. Influences sur les propriétés thermiques :

L'ajout de matériaux minéraux (par exemple, des fillers ultrafins) peut améliorer la résistance au feu et les propriétés thermiques du BAP [23].

Les ajouts minéraux peuvent également influencer la conductivité thermique du BAP [23].

4. Influences sur la durabilité :

Certains ajouts minéraux (par exemple, les fillers de cendres volantes) peuvent améliorer la résistance à l'attaque chimique et à l'abrasion du BAP [23].

- Les fillers minéraux peuvent réduire la fissuration due aux retraits plastique et autogène du BAP, améliorant ainsi sa durabilité [23].

Il est important de souligner que les influences spécifiques peuvent différer selon les types d'ajouts minéraux employés, les proportions et les caractéristiques du mélange de BAP, ainsi que les conditions environnementales.

I.4.4. Conclusion

Les BAP sont une alternative réelle au béton traditionnel, comme l'ont démontré plusieurs exemples. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de leur mise en œuvre requièrent une attention particulière. Parmi les caractéristiques importantes des BAP abordées dans ce chapitre, nous mettons en évidence trois aspects : la limitation du volume de gravillon, l'utilisation de superplastifiants et l'incorporation d'une quantité significative d'addition ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$).

Afin de répondre aux exigences des différentes méthodes de formulation des BAP, nous adopterons directement la formule japonaise.

Étant donné le volume important d'ajout minéral, il est nécessaire d'accorder une attention particulière à ce sujet. Par conséquent, notre programme de recherche vise spécifiquement à étudier l'influence de la vase calcinée en tant que pouzzolane synthétique sur le comportement mécanique des BAP et leur durabilité face aux attaques sulfatiques et à attaques des acides

Chapitre II : Durabilité des bétons autoplaçants

I.1. Introduction

Après avoir examiné les propriétés mécaniques évoquées précédemment, il est essentiel d'aborder d'autres aspects tout aussi importants des bétons, à savoir leur durabilité. Bien que la résistance mécanique ait été utilisée comme critère pour évaluer différents types de béton, l'objectif de cette étude est d'estimer la durabilité des bétons autoplaçants. La durabilité de ces bétons peut être affectée par diverses actions physiques ou chimiques indésirables qui impliquent le passage de fluides (liquides ou gaz) à travers le matériau.

La dégradation chimique du béton se produit lorsque le béton est exposé à un environnement agressif, entraînant une décalcification progressive avec le temps. Ce processus conduit à une augmentation de la porosité du béton, ce qui altère ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part, cette augmentation de la porosité accélère le transport de substances à travers le béton (par perméabilité ou diffusion) et intensifie la dissolution des hydrates, en particulier la portlandite. D'autre part, cela entraîne des changements au niveau des propriétés mécaniques, tels qu'une perte de résistance et de rigidité. De plus, les sollicitations mécaniques provoquent l'apparition de microfissures qui peuvent accélérer le processus de dégradation chimique.

Ainsi, on peut définir la durabilité comme la capacité du béton à résister aux agressions chimiques ou physiques, tout en maintenant son comportement et ses performances conformes aux conditions de service prévues pour la structure.

En règle générale, les agressions chimiques affectent principalement la pâte de ciment dans le béton. Le béton, le mortier et la pâte de ciment hydraté peuvent être considérés comme des matériaux à plusieurs phases, comprenant une phase solide (squelette poreux comme les granulats et les hydrates), une phase liquide (solution interstitielle) et une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂...) présentes à l'intérieur du matériau solide [23].

Les trois principaux processus qui permettent aux substances agressives de pénétrer dans le béton et d'affecter ses qualités mécaniques et protectrices (en particulier contre la corrosion des armatures) sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption. La perméabilité se réfère au transfert de matière causé par une différence de pression, la diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace en fonction d'un gradient de concentration, et l'absorption est le résultat des différences de tension de surface dans les capillaires. Par ailleurs, les trois fluides naturels qui peuvent se déplacer selon les processus mentionnés précédemment et compromettre la durabilité du béton sont l'oxygène, l'eau (avec ou sans ions agressifs) et le dioxyde de carbone. La capacité du béton à résister à la pénétration de ces fluides à l'intérieur du matériau

en suivant les trois mécanismes d'écoulement possibles est donc déterminante pour sa durabilité.

Malgré le fait que les divers mécanismes de transfert agissent simultanément dans la réalité, ils sont étudiés séparément en laboratoire afin de comprendre les propriétés fondamentales impliquées. Ainsi, plusieurs expériences ont été menées pour évaluer les caractéristiques révélatrices de ces processus de dégradation physico-chimique du matériau BAP.

Les paramètres de composition, tels que la compacité et la nature chimique du liant (ainsi que la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction), sont des facteurs déterminants de la durabilité globale. Les règles qui s'appliquent généralement aux bétons classiques sont également normalement applicables aux bétons à hautes performances (BAP) conformément à la norme XP 18-305, désormais appelée NF EN 206-1.

Les informations disponibles dans la littérature concernent divers aspects des bétons autoplaçants, tels que leur microstructure, leur perméabilité aux gaz, la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation, leur résistance au gel-dégel, la pénétration d'agents agressifs qui peuvent provoquer la corrosion des armatures, ainsi que les réactions chimiques internes impliquant des composants provenant de l'environnement ou déjà présents dans le matériau, comme l'alcali-réaction ou les attaques sulfatiques, qui entraînent le gonflement et la fissuration du béton.

Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'effet des ajouts sur la matrice cimentaire varie en fonction de la taille des particules, de leur composition chimique et minéralogique. Les particules plus fines augmentent la compacité du squelette granulaire et réduisent l'épaisseur et la porosité des interfaces entre la pâte et les granulats, formant une zone plus poreuse avec des pores plus grands. Quant à la densité du réseau de bulles d'air, elle dépend de l'utilisation d'un agent entraîneur d'air spécifique, ainsi que de l'effet entraîneur d'air du super plastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. [40]

La durée de malaxage est également un facteur important : un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus.

I.2. Facteurs influençant la durabilité

La durabilité du Béton Autoplaçant (BAP) est influencée par plusieurs facteurs. Voici quelques-uns d'entre eux [25] :

1. Rapport eau/ciment (w/c) : Un faible rapport eau/ciment contribue à améliorer la durabilité du BAP en réduisant la porosité et en minimisant la pénétration de l'eau et des agents agressifs
2. Composition des matériaux cimentaires : L'utilisation de ciments avec des ajouts tels que des cendres volantes, des fumées de silice ou des laitiers de haut-fourneau peut améliorer la durabilité du BAP en réduisant la perméabilité et en améliorant la résistance aux attaques chimiques.
3. Adjuvants et superplastifiants : L'utilisation d'adjuvants et de superplastifiants appropriés peut améliorer la compacité du BAP, réduire la ségrégation et améliorer la résistance aux agents agressifs.
4. Granulats : Le choix des granulats appropriés et la bonne gradation peuvent influencer la résistance à l'usure, la résistance aux attaques chimiques et la durabilité globale du BAP.
5. Techniques de cure : Une cure adéquate du BAP, par le biais de méthodes telles que la cure à la vapeur ou la cure sous membrane, peut améliorer la résistance et la durabilité du matériau.

I.3. Les attaques chimiques des bétons

Les matériaux à matrice cimentaires peuvent subir diverses agressions chimiques. En raison de leur porosité et de la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire, ce qui entraîne des changements dans la composition solide de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction se déroulent à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [41]. Parmi les nombreuses causes de détérioration des matériaux cimentaires, on compte les attaques par les sulfates et la carbonatation.

I.3.1. Actions des sulfates

L'attaque du béton par les sulfates survient suite à une réaction chimique qui se déclenche en présence d'eau entre l'ion sulfate et l'aluminate de calcium hydraté, ainsi que les composants de l'hydrate de calcium présents dans la pâte de ciment durcie. Cette réaction conduit à la formation de deux produits : l'hydrate de sulfoaluminate de calcium, également connu sous le nom d'ettringite, et l'hydrate de calcium, plus couramment appelé gypse. Ces solides ont des volumes bien plus importants que les composants dont ils proviennent, ce qui entraîne

l'apparition de contraintes susceptibles de détériorer la pâte et, finalement, de désintégrer le béton.[26]

I.3.1.1. Sources des sulfates

Les sulfates peuvent avoir une origine naturelle, biologique ou résulter de la pollution domestique et industrielle. Dans certaines régions où les sols renferment du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou de l'anhydrite ($CaSO_4$), il est possible de trouver des concentrations élevées de sulfates, dépassant parfois les 5% [30].

- Afrique du Nord : Na_2SO_4 (58 g/l),
- Prairies Canadiennes: $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (194 g/l), K_2SO_4 (111 g/l), $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ (440 g/l)
- France (Paris) : $CaSO_4$ (2,1 g/l).

Les sulfates présents dans les eaux souterraines peuvent être absorbés par les ions SO_4^{2-} . De plus, les sols alluviaux ou argileux peuvent renfermer des pyrites qui, au contact de l'air et de l'humidité, s'oxydent en sulfates et forment de l'acide sulfurique. Les sulfates peuvent également provenir de la décomposition biologique aérobie de matières organiques riches en soufre, telles que les engrais et les plantes. Il convient de noter que les sources de sulfates peuvent également être internes [26].

- contamination des granulats par du plâtre,
- granulats gypseux,
- sulfures dans certains granulats.

I.3.1.b Mécanisme d'actions des sulfates

Les sulfates de calcium (gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ et anhydrite $CaSO_4$) ainsi que les sulfates de magnésium (epsomite $MgSO_4 \cdot 2H_2O$) sont des roches et des minéraux naturels qui constituent la principale source externe de sulfates présente dans la nature. Toutefois, c'est seulement lorsque ces sulfates se dissolvent dans l'eau, qu'elle soit souterraine ou autre, qu'ils peuvent représenter un danger en pénétrant dans la matrice du béton. Une fois infiltrés, ils réagissent avec les hydrates et modifient leur structure.

Dans le cas du sulfate de sodium, les réactions chimiques se présentent comme suit [27] :

- Formation du gypse secondaire :

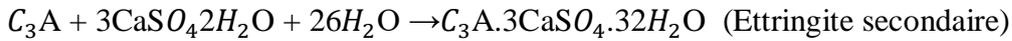


$NaOH$: Alcalinité élevée \rightarrow stabilisation des C-S-H.

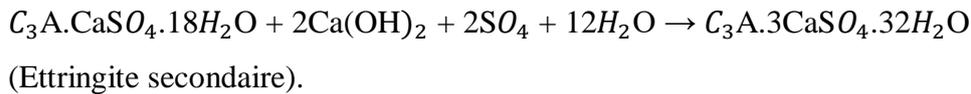
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$: C'est un produit expansif qui se forme exclusivement à l'intérieur de la structure de la pâte de ciment hydraté. Dans la plupart des situations, on observe peu ou pas d'expansion. Néanmoins, son mécanisme a pour effet de réduire la résistance et l'adhérence de la pâte de

ciment, en raison de la dissolution de la portlandite CH, ainsi que du gel et de la décalcification du C-S-H, qui joue un rôle crucial dans les propriétés d'adhérence de la pâte de ciment."Formation d'ettringite secondaire :

a) À partir du C3A anhydre résiduel :



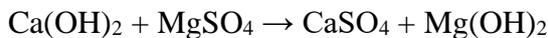
b) À partir des aluminates hydratés :



Lorsque l'ettringite secondaire précipite, cela entraîne la création de cristaux extrêmement fins, de nature colloïdale, qui ont un volume molaire de 3 à 8 fois supérieur à celui du solide initial. Les mécanismes de dégradation dépendent également de la nature du cation (Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} , etc.) qui est associé aux ions sulfates, que ce soit dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Le sulfate de magnésium est considéré comme plus agressif que le sulfate de sodium.

Le sulfate de magnésium réagit par double action :

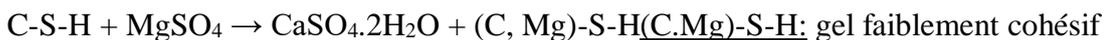
- En présence de magnésium la portlandite réagit pour former de la brucite, le gypse et l'ettringite :



Mg(OH)₂: Brucite (faible solubilité, alcalinité faible, pH faible)



- Substitution des ions Ca^{++} par les ions Mg^{++} dans les C-S-H :



Les sulfates de magnésium ($MgSO_4$) sont souvent présents en quantité élevée dans les eaux souterraines et l'eau de mer. Dans cette situation, à la fois les cations et les anions participent à la réaction. Les ions SO_4^{-2} réagissent avec les aluminates (ou la portlandite) pour former de l'ettringite (ou du gypse), tandis que les ions Mg^{+2} peuvent réagir avec les ions OH^- pour produire de la brucite ($Mg(OH)_2$) ou provoquer un remplacement partiel du calcium par du magnésium dans les C-S-H. Le silicate de magnésium hydraté (M-S-H) ainsi créé ne présente pas de propriétés de liaison, ce qui rend la pâte hydratée molle et incohérente [28].

I.3.2. Actions des acides

Les eaux qui entrent en contact avec le béton sont généralement caractérisées par une faible minéralisation, en particulier en calcium, et sont soit neutres (pH = 7), soit légèrement acides (pH < 7).

Les gradients de concentration entre les eaux agressives et la solution interstitielle du béton, caractérisée par un pH basique supérieur à 12 et une richesse en calcium, sont responsables du mécanisme de dégradation. Par conséquent, les principales espèces qui se retrouvent dissoutes sont les ions calcium Ca^{+2} et les ions hydroxyde OH^{-} [42].

Lorsque la solution interstitielle n'est plus saturée en ions calcium et en hydroxyde, les composés solides qui renferment ces éléments se dissolvent. La concentration en calcium des produits solides diminue à mesure que la concentration en calcium dans la solution poreuse diminue. Le processus de lixiviation débute par la dissolution de la portlandite, suivie par celle des monosulfoaluminates, de l'ettringite et du C-S-H qui perdent leur teneur en calcium [42]

Les milieux acides les plus courants comprennent les eaux naturelles présentes dans les tourbières et les marécages (où le pH peut atteindre 4), les environnements industriels des industries chimiques et agroalimentaires, les réseaux d'égouts (où l'activité bactérienne entraîne la libération d'hydrogène sulfuré par la transformation de produits soufrés, qui, combiné à l'humidité atmosphérique, se condense sous forme d'acide sulfurique, pouvant corroder le béton) et les pluies acides (principalement composées d'acide sulfurique et d'acide nitrique, avec un pH compris entre 4.0 et 4.5, pouvant causer la détérioration de la surface exposée du béton).

Un acide est d'autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. L'acide sulfurique est relativement sans danger car les sulfates de calcium ont une faible solubilité dans l'eau. Cependant, les ions sulfate jouent un rôle nuisible pour le béton en provoquant un gonflement dû aux sulfates. Ainsi, l'acide sulfurique réagit avec la chaux libre présente dans le béton pour former du gypse, ce qui entraîne une augmentation du volume du béton.

La réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux de gypse conduit à une action encore plus destructrice. Ces deux composés réagissent pour former l'ettringite, un produit de réaction moins soluble. L'acide chlorhydrique est particulièrement agressif car le sel correspondant, le chlorure de calcium, se dissout très facilement dans l'eau.

Non seulement les acides inorganiques forts réagissent avec l'hydroxyde de calcium, mais ils attaquent également les autres éléments constitutifs de la pâte de ciment durci, produisant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des gels de silice colloïdaux (acides siliciques). [42]

I.4. Conclusion

Après avoir réalisé des études sur la durabilité de différents types de béton, nous avons observé une corrélation entre le choix des ajouts et/ou substituts utilisés dans la pâte de ciment (dans le cas des ciments composés) et les caractéristiques de transfert (perméabilité, diffusion, absorption) ainsi que la résistance chimique (carbonatation, attaque sulfate et attaque acide) de ces matériaux cimentaires. Cependant, les ajouts minéraux utilisés dans ces études ne permettent pas d'obtenir des conclusions pertinentes sur la durabilité des BAP. En effet, ces derniers, qui contiennent une quantité importante de pâte et d'ajouts minéraux, semblent davantage être influencés par le type et la quantité des ajouts ou des substituts de ciment. Il est donc clairement nécessaire de mener des recherches approfondies sur l'effet de la nature et des proportions des nouveaux ajouts minéraux et substituts de ciment sur la durabilité des BAP.

Chapitre III : la valorisation de la vase dans les BAP

III.1. Introduction

L'utilisation de la vase dans les bétons autoplaçants constitue une approche novatrice et durable dans l'industrie de la construction. Les bétons autoplaçants sont reconnus pour leur facilité de mise en œuvre, leur capacité à remplir des formes complexes sans nécessiter de vibration externe et leur excellente compacité. Ces caractéristiques en font des matériaux de choix pour de nombreuses applications, allant des infrastructures aux bâtiments.

La valorisation de la vase, c'est-à-dire la réutilisation de ce matériau généralement considéré comme un déchet, présente des avantages environnementaux et économiques significatifs. La vase est souvent issue de l'excavation de cours d'eau, de l'entretien des canaux de navigation ou encore de la dérivation de rivières. Plutôt que de la considérer comme un résidu inutile, il est possible de l'intégrer de manière judicieuse dans la fabrication de bétons autoplaçants, en remplacement partiel des granulats traditionnels.

Cette approche de valorisation contribue à réduire l'empreinte environnementale de l'industrie de la construction en limitant l'extraction de matériaux naturels et en réduisant la quantité de déchets rejetés dans l'environnement. De plus, l'utilisation de la vase dans les bétons autoplaçants peut améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau final, sous réserve d'une sélection et d'un traitement appropriés.

Cependant, il convient de noter que l'intégration de la vase dans les bétons autoplaçants demande une étude approfondie des caractéristiques de ce matériau, notamment de ses propriétés chimiques, physiques et mécaniques. Des traitements adéquats, tels que le lavage pour éliminer les impuretés ou la stabilisation pour minimiser les variations de performance, peuvent être nécessaires pour garantir la qualité et la cohérence du béton produit.

En résumé, la valorisation de la vase dans les bétons autoplaçants offre une approche prometteuse pour allier performance structurelle, durabilité et responsabilité environnementale dans le secteur de la construction. En exploitant intelligemment ce matériau sous-utilisé, l'industrie peut faire un pas de plus vers des pratiques de construction durables et respectueuses de l'environnement.

III.2. phénomène de l'envasement

L'envasement se manifeste par l'accumulation de sédiments au sein des réservoirs et des barrages. Cet enjeu hydraulique majeur menace profondément la pérennité des infrastructures hydrotechniques. Ce phénomène découle de l'érosion naturelle des bassins versants et de l'érosion des rives, engendrant ainsi un dépôt direct de quantités considérables de sédiments dans le réservoir du barrage. Les régions à climat aride et semi-aride, comme le Maghreb, en particulier l'Algérie, enregistrent les niveaux les plus élevés de sédimentation. Ces dépôts

peuvent engendrer divers problèmes, tels que l'instabilité des digues, la diminution de la disponibilité en eau et l'obstruction des canaux de drainage et d'irrigation. [30]

III.2.1. L'envasement des barrages en Algérie

L'érosion hydrique désigne le processus au cours duquel les particules se détachent de leur support, étant transportées par l'eau avant d'être ultérieurement déposées par sédimentation [31]. Dans la région du Maghreb, les conditions sont propices à une progression rapide de l'érosion des bassins versants. Les facteurs propiciant ce phénomène incluent un climat irrégulier, une végétation peu dense, des sols peu résistants aux écoulements et aux crues soudaines. Dans cette région, les taux d'érosion sont notoirement élevés, atteignant 5000 t/km²/an dans le bassin versant de l'oued Agrioum en Algérie [31], et excédant 2000 t/km²/an [32]. Les bassins versants de Martil, Ouergha, Lakhdar et Tessaout au Maroc et en Tunisie font face à une érosion des sols qui affecte sérieusement les terres agricoles. Cette problématique touche sévèrement 1,2 million d'hectares de terres dans le nord et le centre du pays, ce qui représente 25% de la superficie terrestre totale [33].

Dans la région nord de l'Algérie, on observe une érosion particulière qui entraîne l'enlèvement d'environ 180 millions de tonnes de sédiments chaque année [31]. Une partie de ces matériaux est captée par les 57 barrages et retenues construits sur le territoire algérien, ce qui équivaut à environ 45 millions de mètres cubes (M m³) de sédiments retenus chaque année [34]. En 2006, la quantité totale de limon était estimée à 1,1 milliard de mètres cubes, représentant un taux de remplissage d'environ 17% [34].

Pour gérer le phénomène de l'envasement, des techniques de gestion des sédiments, telles que le dragage, sont utilisées pour enlever les sédiments accumulés. Cependant, il est également important de mettre en œuvre des pratiques de conservation des sols et de gestion des bassins versants pour réduire l'apport de sédiments dans les voies d'eau.

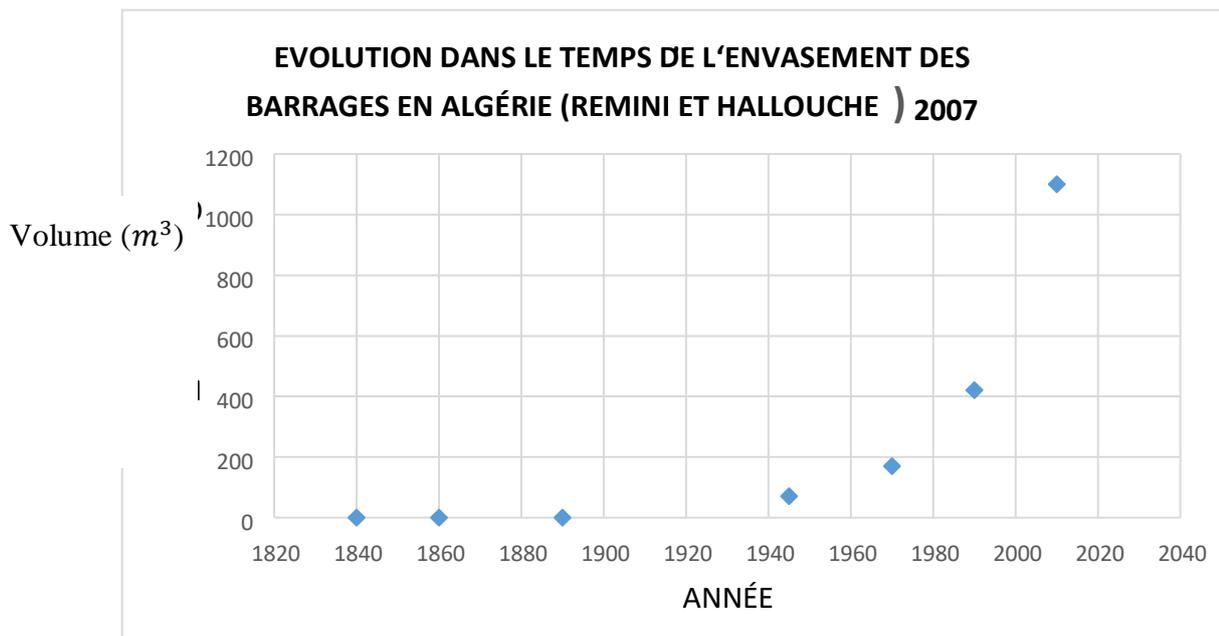


Figure III. 1 : Evolution dans le temps de l'envasement des barrages Algérie.

Les crues brusques et soudaines survenues au cours des cinq dernières années ont provoqué une érosion significative de la couche superficielle du sol. D'après les récents relevés bathymétriques réalisés entre 2005 et 2006 par l'Agence Nationale des Barrages (ANB), certains des principaux barrages ont connu une augmentation considérable de leur taux d'envasement par rapport à celui enregistré en 1986 (consultez le Tableau II.1 pour les données de l'ANB).

Tableau III. 1 : taux d'envasement en 1986 ET 2004.

Barrage	Taux d'envasement annuel 1986	Taux d'envasement annuel 2004
SMBA (Tiaret)	1	1.3
Djorf Torba (Bechar)	1.3	2.6
Ksob (Msila)	0.3	0.6

III.2.2 Les sédiments de dragage

III.2.2.1. Définition et origine

Géologiquement, les sédiments se forment à partir de particules fines issues de l'érosion des roches, et ils tendent généralement à se déposer au fond de l'eau ou sur la surface terrestre. Les attributs des sédiments présentent des variations en fonction de leur origine, de leurs caractéristiques minéralogiques, de leur composition et de leur dimension. Ces facteurs ont également une influence sur la manière dont les sédiments interagissent lors de leur transport par l'eau ou le vent. Ces sédiments peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. [35]

- A. Origine naturelle : Les particules présentes peuvent être classées en deux catégories : endogènes (autochtones) ou exogènes.
- Les particules endogènes (autochtones) sont principalement constituées de matière organique (MO) provenant généralement d'organismes aquatiques, qu'ils soient d'origine animale ou végétale.
 - Les particules exogènes proviennent de fragments minéraux issus de l'érosion éolienne ou hydrique des sols. Elles peuvent également être d'origine organique, telles que les débris végétaux et les feuilles d'arbres.
- B. Origine anthropique : Ces particules peuvent être d'origine organique ou minérale et sont principalement le résultat de l'activité humaine, qu'elle soit industrielle, urbaine ou es matériaux sont très hétérogènes et comprennent généralement :

III.2.2.2. les constitutions des sédiments

1. **Éléments** : En ce qui concerne la constitution chimique, la répartition des éléments au sein du matériau se divise comme suit : environ 80 % sont formés par les composants chimiques majeurs tels que le silicium (Si), l'aluminium (Al), le potassium (K), le sodium (Na) et le magnésium (Mg). Les 20 % restants se composent de carbonates tels que le carbonate de calcium (CaCO_3), le carbonate de magnésium (MgCO_3), ainsi que d'éléments mobiles tels que le manganèse (Mn), le fer (Fe) et le soufre (S). En outre, on trouve également la présence de métaux lourds tels que le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le nickel (Ni) et l'argent (Ag), qui représentent moins de 0,1 % du total. Le souci avec ces métaux lourds réside dans leur incapacité à se biodégrader, ce qui les conduit à s'accumuler dans les chaînes alimentaires, engendrant ainsi des problèmes de bioaccumulation.

- 2. Eau interstitielle :** La proportion du volume des sédiments varie de 20 % à 90 %, et cela est influencé par leur teneur en eau initiale qui peut se situer entre 150 % et 300 %, en fonction de la méthode de dragage utilisée (Dubois, 2006). Cette quantité d'eau peut être classifiée en cinq catégories distinctes. [35].

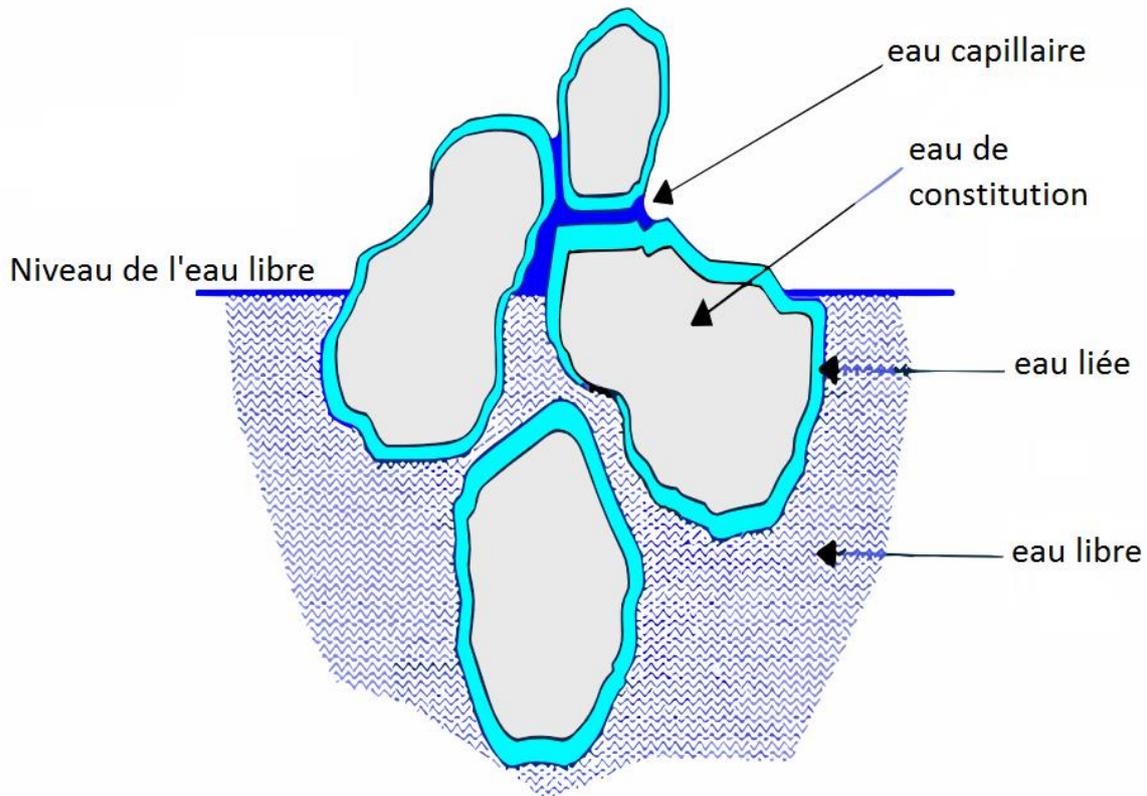


Figure III. 2 : Vue schématique sur les formes de l'eau dans le sol (Marot, 1997)

La distribution de l'eau dans le sol peut être divisée en différentes catégories :

- Eau capillaire : elle est retenue dans les pores étroits du sol grâce à la capillarité, mais elle est également accessible à l'évaporation.
- Eau colloïdale : elle est présente dans les colloïdes du sol et participe à leur hydratation.
- Eau libre : elle se déplace à travers les pores macroscopiques du sol sous l'effet de la gravité et remplit les espaces vides.
- Eau adsorbée : elle est liée à la surface des grains du sol par des forces intermoléculaires.
- Eau de constitution : elle fait partie intégrante de la composition chimique des masses minérales présentes dans la phase solide du sol.

- 3. Matières inorganiques :** La présence de coquilles et de composés minéraux influe sur la composition des sédiments, modifiant ainsi les propriétés physiques et minéralogiques de ces derniers. Ces matériaux peuvent provenir de différentes sources,

notamment de l'érosion des sols, des graviers, des gravillons, des cailloux et des sables. En outre, d'autres constituants peuvent être composés de matières plus fines telles que les vases minérales et les structures squelettiques d'organismes.

- 4. Matières organiques (M.O.) :** L'origine des sédiments est extrêmement diverse, et en règle générale, cette matière organique peut être classée en quatre catégories distinctes : matière organique vivante (biomasse active), matière organique fraîche (débris végétaux), substances en cours d'évolution, et matière humique qui constitue environ 60 % de la matière organique présente dans les sédiments [36].

III.2.2.3. La valorisation des sédiments de dragage dans les BAP

La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants est un sujet de recherche actif qui se situe à l'intersection de plusieurs disciplines, notamment l'ingénierie des matériaux, la géotechnique et la protection de l'environnement. Le dragage est une opération qui consiste à retirer des sédiments du fond des voies navigables pour les maintenir en état de navigabilité. Les sédiments collectés sont généralement traités comme des déchets, mais de plus en plus de recherches visent à les réutiliser dans diverses applications, comme l'élaboration de matériaux de construction, dont le béton autoplaçant.

Les différentes étapes et considérations pour valoriser les sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants :[37]

A. Évaluation initiale des sédiments :

1. Caractérisation : Il faut d'abord caractériser les sédiments en termes de granulométrie, de teneur en eau, et de composition chimique.
2. tests de pollution : Les tests doivent être effectués pour identifier la présence de contaminants tels que des métaux lourds, des hydrocarbures, et d'autres éléments chimiques.[37]

B. Traitement des sédiments

1. Séchage et tamisage : Les sédiments peuvent nécessiter un séchage et un tamisage pour enlever les impuretés.
2. Stabilisation : Dans certains cas, un traitement chimique peut être nécessaire pour stabiliser les contaminants.[37]

C. Élaboration des bétons

1. Conception de la formulation : Il faut définir la formulation du béton en respectant les critères du béton autoplaçant, comme la fluidité et la résistance mécanique.
2. Tests de laboratoire : Avant la production à grande échelle, des tests en laboratoire sont nécessaires pour évaluer les propriétés mécaniques et durables du béton.[37]

D. Évaluations supplémentaires

1. Tests environnementaux : Des tests comme la lixiviation peuvent être nécessaires pour évaluer les impacts environnementaux du béton produit.
2. Suivi en conditions réelles : Avant une adoption à grande échelle, un suivi en conditions réelles (chantiers pilotes) peut être très utile pour évaluer le comportement du matériau.[37]

III.2.2.3.1. Les Avantages de La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants

1. Réduction des déchets : L'utilisation des sédiments de dragage permet de valoriser un matériau autrement considéré comme un déchet.
2. Économies de coûts : La réutilisation de ces matériaux peut réduire les coûts de fabrication du béton.
3. Diversité des sources : Cela permet également de diversifier les matériaux utilisés dans la construction et de réduire la dépendance aux ressources naturelles.[37]

III.2.2.3.2. Les Défis de La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants

1. Qualité variable : La qualité des sédiments peut être très variable, ce qui nécessite un tri et un traitement appropriés.
2. Contaminants : Les sédiments peuvent contenir des éléments polluants (métaux lourds, hydrocarbures, etc.) qui doivent être éliminés ou stabilisés.
3. Compatibilité : Les caractéristiques des sédiments doivent être compatibles avec les exigences techniques du béton autoplaçant, comme la fluidité, la résistance mécanique etc., [37]

Conclusion

La valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants présente des avantages écologiques, économiques et techniques significatifs. Cette approche permet de réduire l'impact environnemental associé à l'élimination des sédiments, tout en offrant une solution durable pour l'approvisionnement en matériaux de construction. Les bétons autoplaçants, connus pour leur facilité de mise en œuvre et leur performance améliorée en termes de compacité et de résistance, peuvent bénéficier de l'incorporation des sédiments de dragage en tant que remplissage partiel ou total.

Sur le plan environnemental, l'utilisation des sédiments de dragage permet de réduire la nécessité de stockage coûteux et potentiellement préjudiciable à long terme pour les

écosystèmes aquatiques. En outre, cela réduit la demande de matériaux naturels tels que le sable et les granulats, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles.

D'un point de vue économique, la valorisation des sédiments peut réduire les coûts liés à l'élimination des déchets, tout en offrant une source abordable de matière première pour la production de béton autoplaçant. Cela pourrait également ouvrir la voie à de nouvelles opportunités économiques et à la création d'emplois dans le secteur de la gestion des sédiments et de la construction durable.

Cependant, il est important de prendre en compte certains défis et considérations. Les propriétés des sédiments de dragage peuvent varier considérablement en fonction de leur origine et de leur composition, ce qui peut influencer les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton. Des études approfondies sont nécessaires pour évaluer l'impact de l'incorporation de ces matériaux sur la qualité du béton, ainsi que sur la libération éventuelle de substances nocives dans l'environnement.

En conclusion, la valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplaçants présente un potentiel prometteur pour une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. Cependant, des recherches continues et des essais approfondis sont nécessaires pour garantir que cette approche soit réalisable d'un point de vue technique, économique et environnemental, tout en maintenant les normes de qualité et de sécurité requises pour les structures en béton.

Chapitre IV : partie pratique

IV.1. Introduction

Durant les dernières années, un grand nombre d'études ont été menées concernant l'emploi des vases en tant que substitut partiel du ciment dans les mélanges bétonnés. Les investigations réalisées dans ce domaine mettent clairement en lumière le rôle de la vase en tant que pouzzolane active, contribuant de manière significative à l'amélioration des propriétés mécaniques de la matrice cimentaire. À partir de cette perspective, nous avons mené notre recherche qui se manifeste par : étude de durabilité d'un béton auto plaçant à base des sédiments de dragage du barrage de BENI AMRANE

IV.2. Les matériaux utilisés

IV.2.1. Le ciment

Dans cette étude, nous avons utilisée CEM I de résistances 42,5 provenant de l'usine Lafarge M'silla.

A. Les caractérisations chimiques

Tableau IV. 1 : caractéristiques chimiques du CEMI 42,5 ES M'silla

Composition chimique	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO libre	CI	Ins	P.F
Teneur(%)	20.3	3.56	4.83	63.3	1.4	0.5	0.13	2.0	0.61	0.017	0.8	3.6

B. Les caractérisations minéralogiques

Tableau IV. 2 : Les caractéristiques minéralogiques de CEMI 42,5 ES M'SSILA

phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker %
Clinker	C_3S	55
	C_2S	23
	C_3A	02
	C_3AF	17
	CaO_L	<01
Régulateur de prise	gypse	04

C. Les caractérisations physiques

Tableau IV. 3 : Les caractéristiques Physiques de CEM I 42,5 ES M'SSILA

Caractéristiques		Résultats	Unités	Normes
Consistance normalisée (%)		L'eau 127 ml 25.4	%	EN 196-3
Temps De prise	Début	272	Minute	EN 196-3
	Fin	383		
Masse volumique absolue du ciment		3.13	(g/cm^3)	EN 196-6
Finesse suivant la méthode Blaine		3529	(cm^2/g)	EN 196-6

D. Les caractérisations mécaniques

Tableau IV. 4: Les caractéristiques mécanique de CEMI42,5 ES M'SSILA

Echéances en jours	Flexion (N/mm^2)	Compression (N/mm^2)
2j	4.6	21.8
28j	8.0	52.1

IV.2.2. La vase

La calcination de la vase de barrage, également connue sous le nom de traitement thermique, est une technique qui implique de chauffer les sédiments ou la vase à des températures élevées dans le but de modifier leurs propriétés physiques et chimiques. Cette méthode est parfois utilisée pour transformer les sédiments en un matériau utilisable, comme une source de matière première pour la fabrication du béton ou d'autres applications de construction.

Voici les étapes générales de la méthode de calcination de la vase de barrage pour une utilisation potentielle dans le béton :

- 1. Collecte et Préparation :** Les sédiments ou la vase doivent être collectés à partir du réservoir du barrage. Avant le traitement thermique, les sédiments doivent être préalablement séchés pour éliminer l'humidité et réduire la consommation d'énergie lors de la calcination.
- 2. Calcination :** Les sédiments préparés sont chauffés à 750°C dans un four. La température de calcination peut varier en fonction des propriétés des sédiments et des objectifs du traitement, mais elle est généralement supérieure à 600 degrés Celsius.
- 3. Refroidissement :** Après la calcination, les sédiments sont refroidis pour les ramener à une température ambiante. Le refroidissement peut se faire à l'air libre ou à l'eau.
- 4. Broyage :** Les sédiments calcinés sont généralement broyés pour obtenir une taille de particules appropriée. Cela peut augmenter la réactivité des particules lorsqu'elles sont incorporées dans le béton.
- 5. Analyse et Traitement Supplémentaire :** Les propriétés chimiques et physiques des sédiments calcinés doivent être analysées pour s'assurer qu'elles sont appropriées pour une utilisation dans le béton. Des ajustements chimiques ou mécaniques peuvent être nécessaires en fonction des résultats de l'analyse.

6. Incorporation dans le Béton : Les sédiments calcinés peuvent être ajoutés comme un remplacement partiel du ciment ou d'autres matériaux dans le mélange de béton. La quantité optimale d'incorporation dépendra des caractéristiques des sédiments et des exigences du béton final.

Il est important de noter que la calcination de la vase de barrage pour une utilisation dans le béton est une technique complexe qui nécessite des évaluations approfondies des propriétés des sédiments, ainsi que des analyses de faisabilité technique et environnementale. Des études approfondies et des analyses de laboratoire sont nécessaires pour garantir que les sédiments calcinés répondent aux normes de performance et de sécurité requises pour l'utilisation dans la construction.

A. Caractérisation chimique

Tableau IV. 5 : Analyse chimique élémentaires effectuées par « Fluorescence X »

Ech	Perte au feu %	Sommes des conc %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2
La vase	16.18	100	47.33	14.68	5.81	11.07	1.39	0.09	1.84	0.64	0.26	0.70
La vase calcinée	0.59	100	57.00	17.44	7.14	12.05	1.46	0.23	2.15	0.81	0.32	0.82

B. Caractérisation Physique

Tableau IV. 6 : les caractéristiques physiques de la vase

caractéristique	Consistance normale	Début de prise (minute)	Fin de prise (minute)	La masse volumique (g/cm^3)	Finesse suivant la méthode Blaine (cm^2/g)
La vase calcinée refroidit à l'air libre 15%	L'eau : 130.5 ml 26.1%	275	320	2.72	5270
La vase calcinée refroidit à l'eau 15%	L'eau : 124.5 ml 24.9%	270	350	2.72	5270

IV.2.3. les granulats

IV.2.3.1. sable

A. les caractéristiques physiques

Sable d'Oued Souf

Tableau IV. 7 : les caractéristiques physiques de sable

Caractéristiques		S. de oued souf		Norme
Masse volumique apparente (g/cm ³)		2.63		NF EN 1097-3
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.65		NF EN 1097-6
Equivalent de sable(%)	Esv	81.73	83.58	NF EN 933-8
	Esp	85.43		
Friabilité (%)		28.16		NA 2608
Pourcentage de fines (%)		1.32		NF EN 933-1
Absorption (%)		2.33		NF EN 1097-6
Le bleu de méthylène (ml/g)		0.26		NF EN 932-2

B. analyse granulométrique NF EN 933-1

Tableau.IV.8 : Les résultats de l'analyse granulométrique du sable

M1=267.94g			
M2=264.8g			
Ouverture tamis(mm)	Masse refus (g)	% refus cumulés	% cumulés tamisât
4	0.85	1.7	98.3
2	3.81	3.16	96.84
1	21.15	11.05	88.95
0.5	77.87	40.25	59.75
0.25	97.83	76.62	23.38
0.125	57.41	98	2
0.063	4.71	99	1
fond	0.40		

$M_f = 2.31$

Le pourcentage de tamisât de fines (f) sur le tamis de $63 \mu m$:

$M_1 - M_2 = 3.14g$

$$f = \frac{(M_1 - M_2) / \text{fond}}{M_1} \times 100 = 1.32 \%$$

Selon cette analyse, il apparaît que le sable d'Oued Souf est une option de sable moyenne qui ne requiert pas de mélange avec un sable correcteur pour être utilisée.

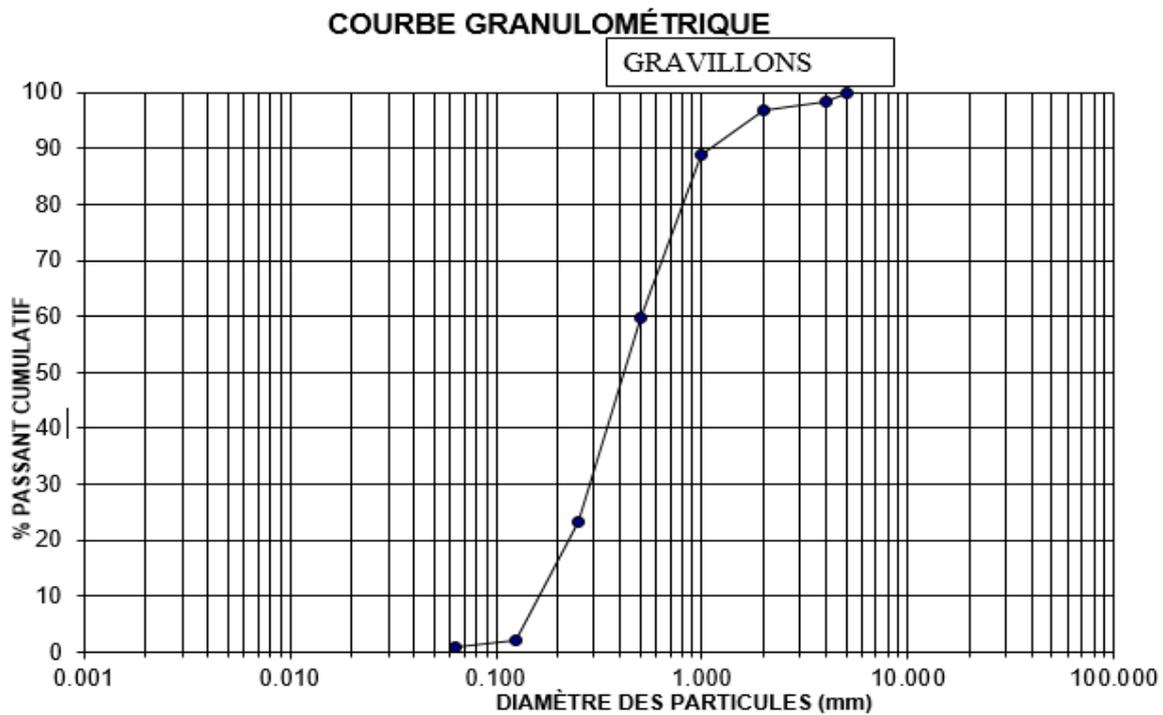


Figure IV. 1 : courbe d'analyse granulométrique

IV.2.3.b. Gravier

A. les caractérisations physiques

Le gravier utilisé dans cette étude c'est le gravier de chelghoum laid

Tableau.IV.9 : la caractérisation physique de gravier

Caractérisation	3/8	8/15
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.67	2.69
Masse apparente absolue (g/cm^3)	2.45	2.43
Humidité (%)	0.39	0.48
Absorption (%)	0.23	0.18
Porosité (%)	0.45	0.46

B. Coefficient d'aplatissement NF EN 933-3

Gravier 3/8 :

M0 = 1764g

Tableau.IV.10 : coefficient d'aplatissement de 3/8

Tamis	Refus des tamis (g)	Grilles	Passant des grilles (g)
8	14	5	4
6.3	583	4	50
5	540	3.15	63
4	351	2.5	73
Totale (M1)	1488	Totale (M2)	190

Coefficient d'aplatissement (%) : $Fi = \frac{M2}{M1} \times 100 = \frac{190}{1488} \times 100 = 12.76 = 13\%$

Gravier 8/15

M0 = 3391g

Tableau.IV.11 : coefficient d'aplatissement de 8/15

Tamis	Refus des tamis (g)	Grilles	Passant des grilles (g)
16	428	10	59
12.5	960	8	105
10	944	6.3	110
8	712	5	96
6.3	268	4	35
Totale (M1)	3312	Totale (M2)	351

Coefficient d'aplatissement (%) : $Fi = \frac{M2}{M1} \times 100 = \frac{351}{3312} \times 100 = 10.59 = 11\%$

C. Los angles NF EN 1097-2

Tableau.IV.12 : coefficient los angles

Echantillon	La masse initiale (g)	La masse finale (g)	Coefficient LA $LA = \frac{Mi - Mf}{Mi}$
3/8	5000	3719.4	23 %
8/15	5000	3834.4	26

D. Analyse granulométrique NF EN 933-1

Gravier 3/8

Masse sèche totale : M1= 1754.6g après lavage : M2=1752.4

La masse retirées par lavage ; M1-M2= 2.2g

Tableau.IV.13 : analyse granulométrique de gravier 3/8

Ouverture (mm)	tamis	Masse refus (g)	% refus cumulés	%cumulés tamisât
10		0	0.6	99.4
8		11.4	1.3	98.7
6.3		372.7	22.5	77.5
4		1183.3	89.9	10.1
2		163.8	99	1
1		4	99.5	0.5
0.5		1.8	99.6	0.4
0.25		1.6	99.7	0.3
0.063		1.7	100	0
fond		0.3	F=0.12 g	

Gravier 8/15

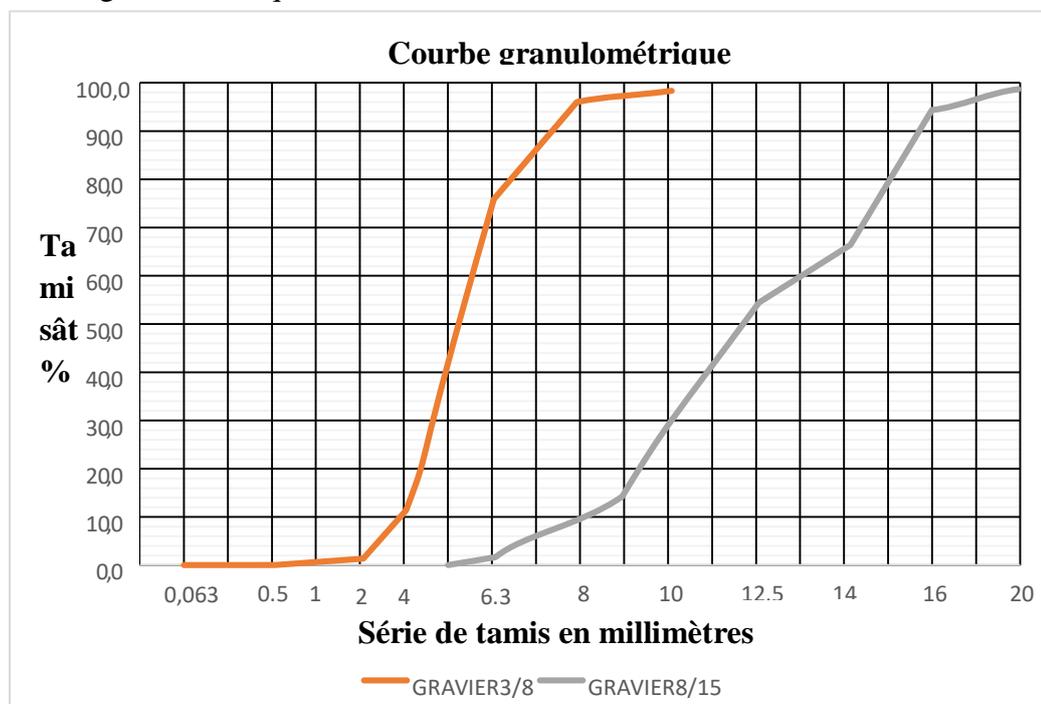
Masse sèche totale : M1= 3716.6g Masse après lavage M2= 3713.4g

La masse retirées par lavage M1-M2= 3.2g

Tableau.IV.14 : analyse granulométrique de gravier 8/15

Ouverture tamis (mm)	Masse refus (g)	%refus cumulés	% cumulés tamisât
20	0	10	90
16	351.6	19	81
14	532.4	33	67
12.5	446	45	55
10	910.4	70	30
8	773.1	91	9
6.3	290.4	98	2
4	36.1	99	1
2	5.3	99	1
0.063	11.1	100	0
Fond	0.5	F= 0.09	

E. La courbe granulométrique

**Figure. IV. 2** : courbe d'analyse granulométrique de gravier 3/8et 8/15.

IV.4. Formulation d'un béton autoplaçant

Dans notre étude nous avons basé sur étude de la durabilité du béton autoplaçant sans et avec la boue calcinée.

Trois variétés de béton ont été réalisées (BT : BAP témoin 100% ciment, béton avec 15% de vase calcinée refroidie à l'air ajoutée en substitution, BAP avec 15% de la vase calcinée refroidie à l'eau ajoutée par substitution) pour savoir si l'utilisation de la vase de BENI AMRANE dans le béton autoplaçant améliore la durabilité de ce béton en utilisant la vase avec un pourcentage de 15%, ce qui conduit à des résistances plus élevées à 28 jours. [39]

La méthode japonaise à été utilisé pour la formulation du béton

IV.4.2. les dosages des constituants

Tableau.IV.15 : les dosages des constituants pour $1m^3$

constituant	ciment	eau	Sable	G3/8	G8/15	filler
Dosage (kg)	350	164.5	836.84	379.4	382.26	120

Protocole de malaxage de béton

- malaxer à sec le gravier (3/8 et 8/15), le sable, pouzzolane pendant 30 secondes afin d'homogénéiser le mélange
- Ajouté pendant 1 min la 1^{ère} quantité d'eau (70%)
- Ajouté pendant 1 min la 2^{ème} quantité d'eau (30%) mélange avec l'eau
- Malaxer pendant 5min
- Arrêt le malaxage pendant 2min
- Remalaxer pendant 30sec

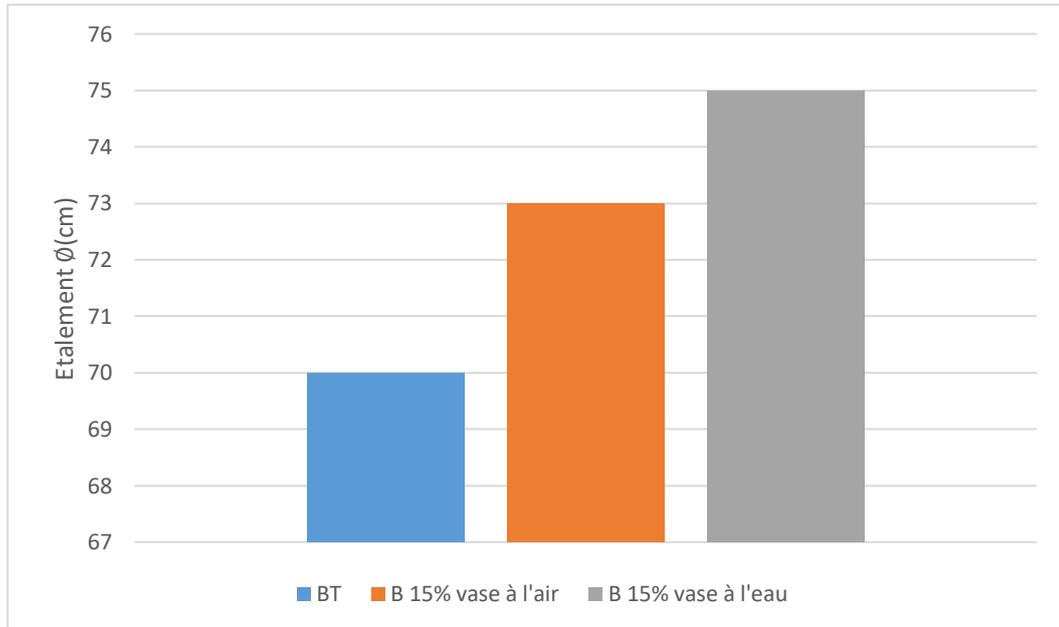
IV.5.Caractérisation à l'état frais de BAP

IV.5.1 l'essai d'étalement

Le but de l'essai d'étalement pour le béton autoplaçant est de mesurer la capacité du béton à s'étaler de manière autonome et à remplir le moules de manière uniforme sans besoin de vibration ou de compactage externe. Cet essai évalue la fluidité et la capacité d'écoulement du béton autoplaçant, ce qui est essentiel pour garantir une mise en place efficace et une qualité de finition optimale dans diverses applications de construction.

Tableau.IV.16 : résultat de l'essai d'étalement

Essai	BT	B 15% vase à l'air	B 15% vase à l'eau
Etalement \emptyset (cm)	70	73	75
Superplastifiant %	1	1.7	1.6

**Figure. IV. 3** : les résultats de l'essai d'étalement de BAP

L'augmentation de l'étalement du béton avec 15 % de la vase calcinée refroidit est due à la granularité plus élevée de la vase calcinée par rapport au ciment.

Les résultats montrent que le BAP testées vérifie la condition d'étalement imposée par la recommandation de l'AFGC ($60 \leq \emptyset \leq 75$).

IV.5.2. l'essai de boit en L

L'essai de la boite en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage et la ségrégation dynamique.

Tableau.IV.17 : résultat de l'essai de boit en L

Essai	BT	B 15% vase à l'air	B 15% vase à l'eau
Boit en L %	83	90	95

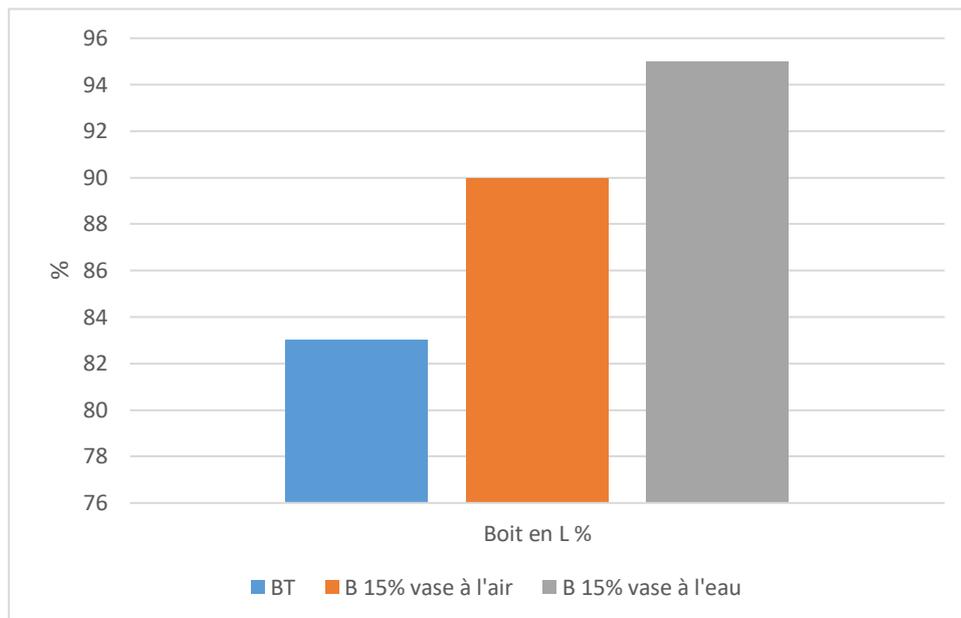


Figure. IV. 4 : les résultats de boit en L

La ségrégation dynamique des BAP est caractérisée par l'essai de boit en L .on peut voir aussi que toutes les formulations présentent des taux de remplissage supérieur à 80% par conséquent ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné et cela malgré les armateurs qui font obstacle

IV.5.3. stabilité au tamis

Tableau.IV.18 : résultat de l'essai de stabilité au tamis

Essai	BT	B 15% vase à l'air	B 15% vase à l'eau
Stabilité au tamis	6.33	7.15	8

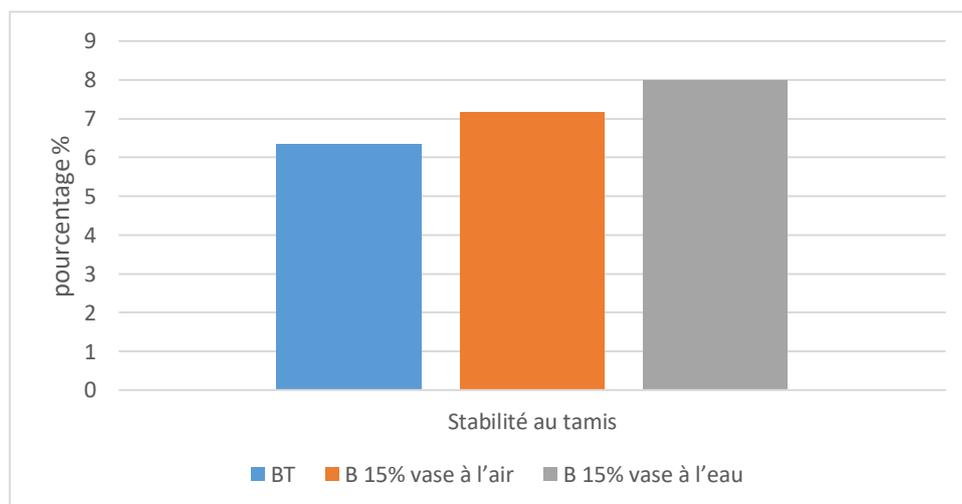


Figure. IV. 5 : résultat de l'essai de stabilité au tamis

Pour la ségrégation statique, les résultats issus des essais de stabilité au tamis montrent que les trois variétés de bétons ont une stabilité satisfaisante (entre 0 et 15 %) qui est assurée d'une part, par l'importante de quantité de mortier (sable+ciment) que contient le béton autoplaçant et d'autre part, par la nature de l'addition.

Les résultats obtenus concernant tous les bétons que nous avons confectionné sont satisfaisants et répondent aux recommandations de l'AFGC. Ils présentent une bonne réponse vis-à-vis de l'écoulement dans un milieu confiné la boîte en L, un bon étalement au cône d'Abrams et boîte en L une excellente stabilité vis-à-vis du risque de ségrégation.

IV.6. Caractérisation à l'état durci

IV.6.1 L'essai de compression

Nous avons effectué les essais de la résistance à la compression sur des éprouvettes cylindrique (11x22) cm avec trois types de béton (témoin, avec 15% de la vase refroidit à l'air libre et avec 15% de la vase refroidit à l'eau). Ces éprouvettes conserve dans un bassin d'eau jusqu'à le jour de l'essai.

Les essais ont été appliqués après (7, 14 , 28 et 70 jours).

IV.6.1.1. L'équipement nécessaire

Presse de compression, est l'équipement principal nécessaire. Elle applique une charge progressive sur l'échantillon de béton jusqu'à ce qu'il se rompe.

Éprouvettes de béton cylindrique (11x22) sont préparé selon la méthode japonaise

Règle et équerre pour mesurer et découper les échantillons de béton aux dimensions appropriées.

Balance précise pour peser avec précision les éprouvettes

Logiciel de contrôle et d'acquisition de données

Équipement de sécurité

Normes et procédures de test NF EN 196-1

IV.6.1.2 But de l'essai

L'essai de compression du béton a pour but principal de déterminer la résistance à la compression du matériau. C'est une évaluation essentielle dans le domaine de la construction et du génie civil. Voici les principaux objectifs de l'essai de compression du béton :

- Évaluation de la résistance du béton : L'essai permet de mesurer la capacité du béton à résister aux charges de compression. Cela signifie qu'il évalue la capacité du béton à supporter des charges qui tendent à le comprimer.

- Contrôle de la qualité : Il est utilisé pour vérifier si le béton utilisé dans un projet de construction ou dans la fabrication d'éléments préfabriqués atteint les niveaux de résistance requis. Cela garantit la qualité du matériau.
- Validation des spécifications : Les résultats de l'essai aident à déterminer si le béton satisfait aux spécifications et aux normes de construction en vigueur. Cela garantit que les normes de sécurité sont respectées.
- Conception et dimensionnement des structures : La résistance à la compression du béton est un paramètre critique dans la conception et le dimensionnement des éléments structuraux tels que les poutres, les colonnes, les fondations, etc. Les ingénieurs utilisent ces données pour garantir que les structures sont suffisamment solides pour supporter les charges prévues.
- Recherche et développement : Les essais de compression sont également utilisés dans la recherche et le développement pour étudier le comportement du béton dans différentes conditions, évaluer de nouveaux mélanges de béton et développer des matériaux plus performants.
- Évaluation de la durabilité : La résistance à la compression est un facteur important pour évaluer la durabilité du béton dans des environnements exposés à des contraintes mécaniques ou à des conditions environnementales sévères.
- Assurance qualité : Les fabricants de béton utilisent également l'essai de compression pour garantir la qualité de leur production et s'assurer que leurs produits répondent aux spécifications requises.

En résumé, l'essai de compression du béton est essentiel pour s'assurer de la résistance et de la qualité du matériau dans le domaine de la construction et de l'ingénierie, ainsi que pour garantir la sécurité des structures et des infrastructures.

IV.6.1.3. conduit de l'essai

Retirez l'éprouvette de l'eau et laissez-la à l'air libre pour qu'elle sèche.

Nettoyer bien la presse et peser l'éprouvette

Placer l'éprouvette sur la machine de compression de manière à ce qu'elle soit centrée et bien alignée avec l'axe de la charge.

Enregistrer la charge et le déplacement de l'éprouvette pendant le test.

Arrêter le test lorsque l'éprouvette se rompt c'est la machine n'est pas automatique

Calculer la résistance à la compression du béton en divisant la charge maximale par la section transversale de l'éprouvette. Cette résistance est généralement exprimée en méga pascals (MPa).



Figure. IV. 6 : éprouvette prête à l'essai de compression sur une balance précise



Figure. IV. 7 : éprouvette dans la presse après essai la compression

IV.6.1.3. les résultats de compression

Les résultats des mesures des résistances à la compression ont été obtenus par écrasement des éprouvettes (11, 22) cm à base de 15% de la vase calcinée refroidit à l'air et 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau et un béton témoin, la figure. IV. 8 montre les résistances à la compression des bétons en MPa en fonction du temps.

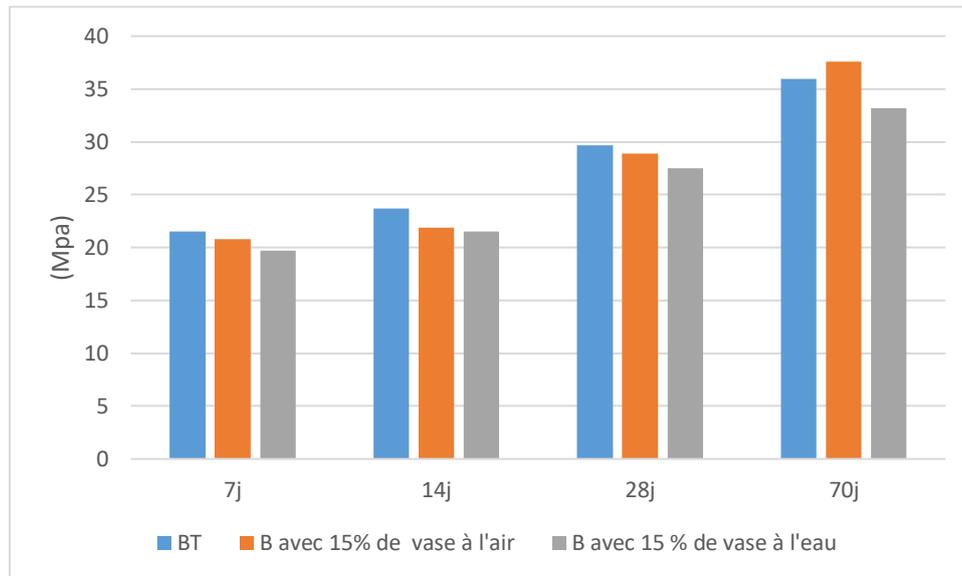


Figure. IV. 8: les résultats de compression

D'après les résultats obtenus on remarque que les résistances à la compression de tous les BAP testés augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute. En comparant les classes de résistance, le BAP à base de la vase calcinée refroidit à l'air (BAPa) présente des résistances mécaniques à la compression plus élevées (37.6 MPa à 70 jours) par rapport aux BAP à base de vase calcinée refroidit dans l'eau (BAPe) $R_c = 33.2$, et le BAP témoin (BAPt) $R_c = 35.95$.

L'incorporation de la vase calcinée refroidit à l'air génère une accélération de la résistance mécanique des bétons dans lesquels elle est incorporée. Les particules de la vase calcinée lorsqu'elles sont bien défloculées par le superplastifiant, favorisent l'hydratation du ciment et de la vase, principalement par un effet pouzzolanique et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense d'autant plus que la vase présente une finesse plus élevée. Ces effets ont une influence visible sur la résistance mécanique.[44]

IV.6.2 Les essais de la durabilité

IV.6.2.1. L'essai d'absorption

IV.6.2.1.1. But de l'essai

Une absorption excessive d'eau peut indiquer une mauvaise qualité du BAP, ce qui peut affecter sa durabilité et sa résistance à long terme.

Une absorption d'eau excessive peut rendre le BAP plus vulnérable à la pénétration de l'eau, des chlorures et d'autres substances agressives. Cela peut entraîner une détérioration prématurée de la structure en béton. En mesurant l'absorption, les ingénieurs peuvent estimer la durabilité attendue du BAP dans des environnements spécifiques.

IV.6.2.1.2. Conduit de l'essai

Couper chaque éprouvettes (11x22) on 4 pièces horizontalement



Figure. IV. 9: coupage des éprouvettes

Mettre les coupes dans une étuve ($105C^0$) pendant 24h

Retire les coupes d'étuve et laisse à refroidir

Peser les coupes sèches et laisser dans l'eau pendant 24h

Retirer les coupes de l'eau et sécher superficiellement avec un chiffon

Peser les coupes humides et calculer le pourcentage d'absorption

IV.6.2.1.3. les résultats

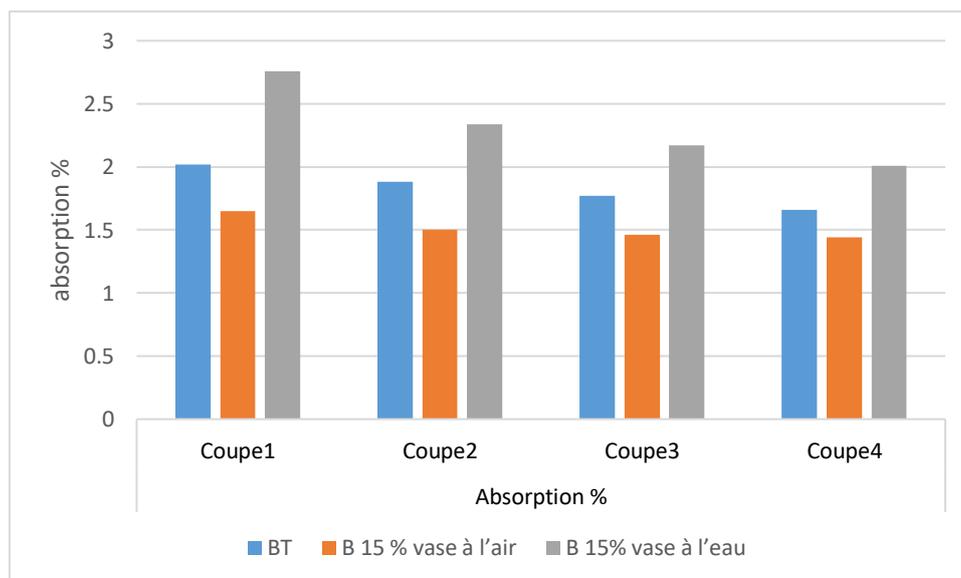


Figure. IV. 10 : les résultats de l'essai d'absorption

D'après les résultats on remarque que les pourcentages de l'absorption est relativement faible, le grand pourcentage a marqué c'est 2.76% dans le béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau, le plus faible pourcentage est marqué pour le béton avec 15% de la vase refroidit à l'air. A partir de cela, nous pouvons dire que notre béton n'est pas très exposé à la pénétration de l'eau et autres substances agressives.

Note : pour les essais des attaques par les chlorures et attaques par les sulfates on a fait le carottage (5.5x11) cm en premier lieu pour minimiser le volume des acides utilisés



Figure. IV. 11: la machine utilise pour le carottage des éprouvettes



Figure. IV. 12 : les éprouvettes après le carottage

IV.6.2.2. l'attaque par les chlorures

IV.6.2.2.1. but de l'essai

- L'essai d'attaque par les acides sur le béton autoplaçant a pour but d'évaluer la résistance du matériau à l'action des acides. Cet essai est important pour plusieurs raisons :
- Il permet de déterminer comment le béton autoplaçant réagit aux acides, ce qui est essentiel pour évaluer sa durabilité dans des environnements où il pourrait être exposé à des acides, tels que les milieux industriels ou les zones où des produits chimiques corrosifs sont présents.
- Dans notre étude l'essai d'attaque par les acides peut aider si on peut valoriser la vase de BENI AMRANE ou non
- Il peut aider à concevoir des structures et des revêtements de béton qui offrent une protection efficace contre la corrosion due à des acides, ce qui peut prolonger la durée de vie des éléments de construction.
- Il permet de mieux comprendre comment le béton autoplaçant se comporte lorsqu'il est exposé à des acides, ce qui est utile pour la recherche et le développement de nouveaux mélanges et matériaux. Par exemple l'utilisation de la vase dans le béton

IV.6.2.2.2. conduit de l'essai

Préparer la solution de l'acide par mélange 5% de HCL avec 95 % de l'eau distillé pour chaque

11



Figure. IV. 13:les solutions de HCL et H_2SO_4 dans les flacons

Mettre les éprouvettes dans une étuve pendant 24h après laisser refroidir à une température ambiante

Mettre les éprouvettes dans la solution

Ajoutez une grande quantité d'eau distillée pour minimiser la concentration de l'acide, afin de retirer les éprouvettes facilement après les avoir pesées. Répétez ce processus tous les 3 jours.

Renouvelez la solution chaque semaine.



Figure. IV. 14: les éprouvettes dans l'étuve pendant 24h

IV.6.2.2.3.les résultats

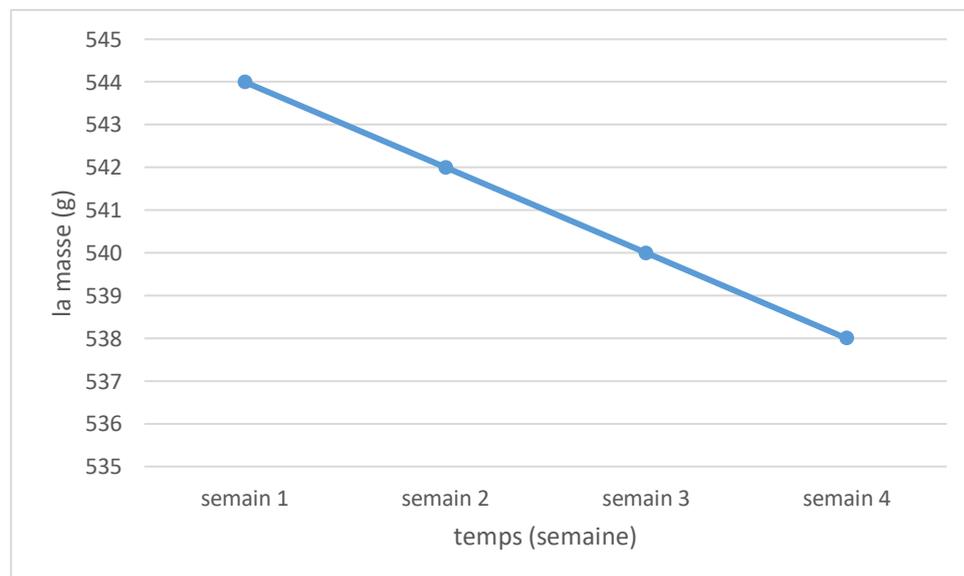


Figure. IV. 15 : perte de masse du béton témoin immergé dans la solution HCL



Figure. IV. 16 : éprouvette du béton témoin immergé dans HCL

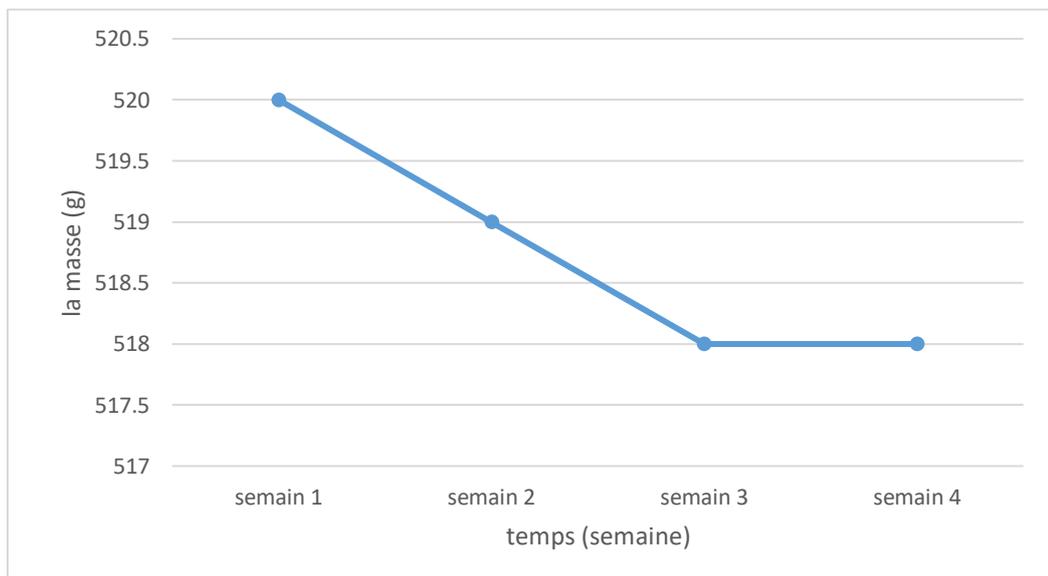


Figure. IV. 17 : Perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution HCL



Figure. IV. 18 : éprouvette du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution HCL

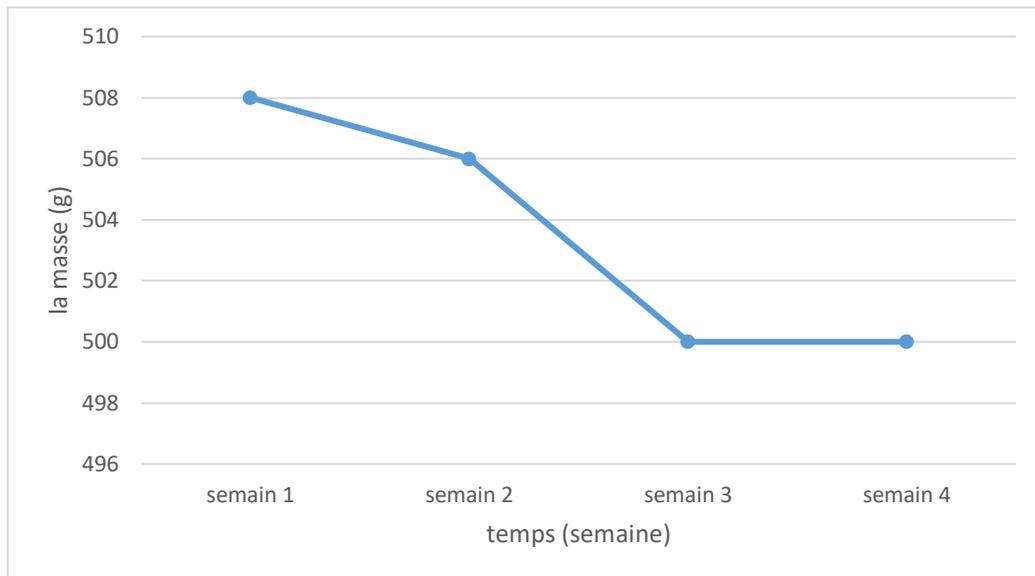


Figure. IV. 19 : Perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau immergé dans la solution HCL



Figure. IV. 20 : éprouvettes du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau immergé dans la solution HCL

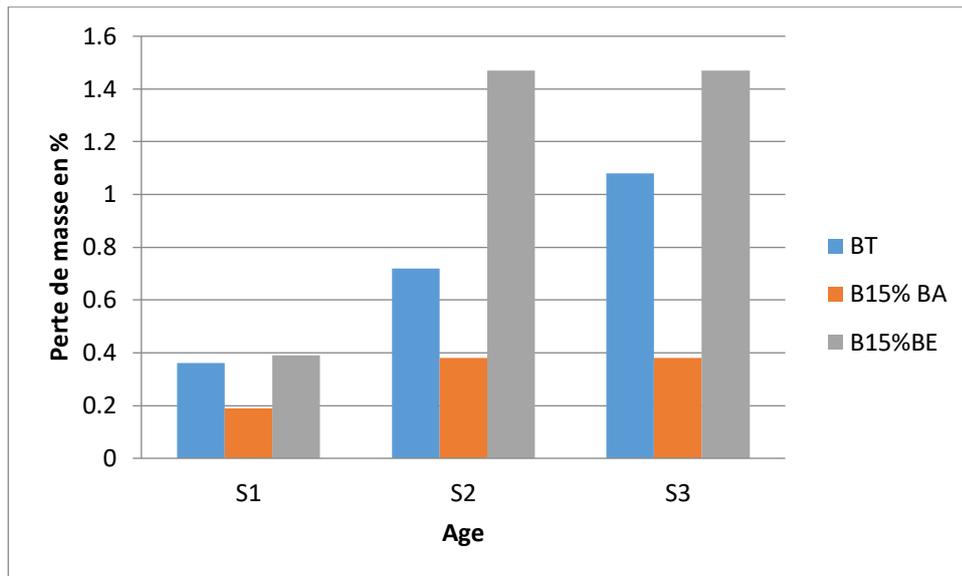


Figure. IV. 21 : Histogramme comparatif de la perte de masse en fonction d'âge des bétons immergés dans la solution HCl

D'après les résultats on remarque que les BAP formulés subit une dégradation de masse, dont BAP E_{15%} perd environ 1.5 % de son poids après 21 jours d'immersion alors que le BAP T et BAP A_{15%} perdent 1.1% et 0.35% de leurs poids respectivement.

On constate aussi que le BAP A_{15%} résiste mieux à l'attaque de l'acide chlorhydrique par rapport aux autres bétons

L'incorporation de la vase calcinée et refroidit à l'air dans la pâte des BAP avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air augmente la résistance chimique de ces bétons vis-à-vis des agressions à l'acide HCl. Elle réduit les pores capillaires par le remplissage de ces pores par du gel de CSH de seconde génération formé à partir de la vase et la portlandite.

On conclut que la réaction pouzzolanique qui a fait la différence pour les BAP à base de vases calcinée et refroidit à l'air et dans l'eau ainsi, nous pouvons lier la meilleure résistance chimique à la résistance à la compression. En général, nous remarquons une diminution de la perte en masse avec l'augmentation de la résistance à la compression et ceci pour tous les bétons d'études.

IV.6.2.3. L'attaque par les sulfates

IV.6.2.3.1 But de l'essai

- Cet essai est essentiel pour évaluer sa durabilité dans des environnements où il pourrait être en contact avec des sulfates, tels que les sols, les eaux souterraines ou les eaux de mer.

- Il peut contribuer à la recherche et au développement de nouveaux mélanges de béton autoplaçant (par exemple la vase) qui offrent une meilleure résistance aux sulfates tout en maintenant d'autres propriétés souhaitées.

IV.6.2.3.2 conduit de l'essai

Prépare la solution de l'acide par mélange 5% de H_2SO_4 avec 95 % de l'eau distillé pour chaque l

Mettre les éprouvettes dans une étuve pendant 24h après laisser refroidir à température ambiante

Mettre les éprouvettes dans la solution

Renouveler la solution chaque semaine

IV.6.2.3.3. les résultats

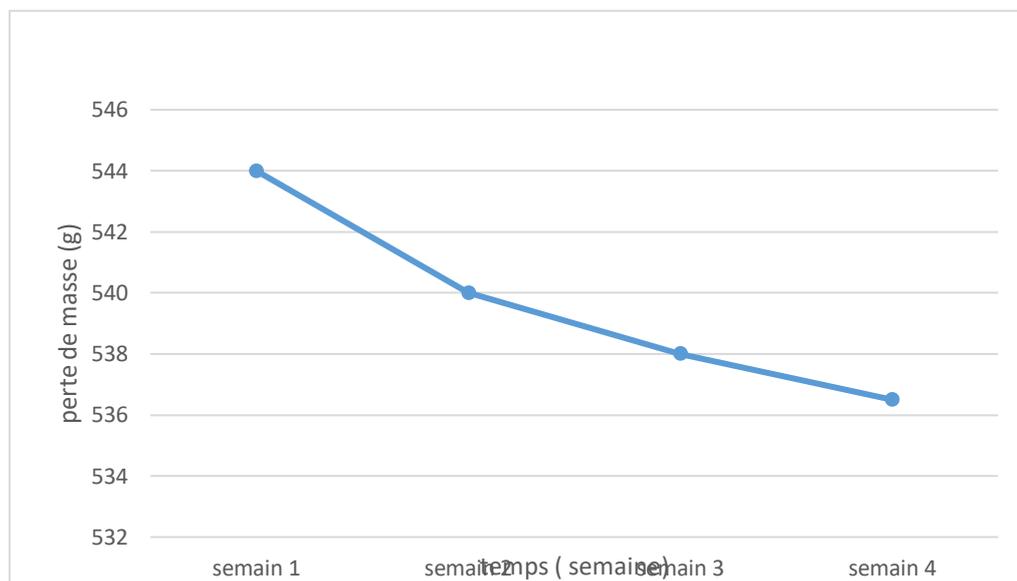


Figure. IV. 22 : Perte de masse du béton témoin immergé dans la solution H_2SO_4



Figure. IV. 23 : éprouvettes du béton témoin immergé dans la solution H_2SO_4

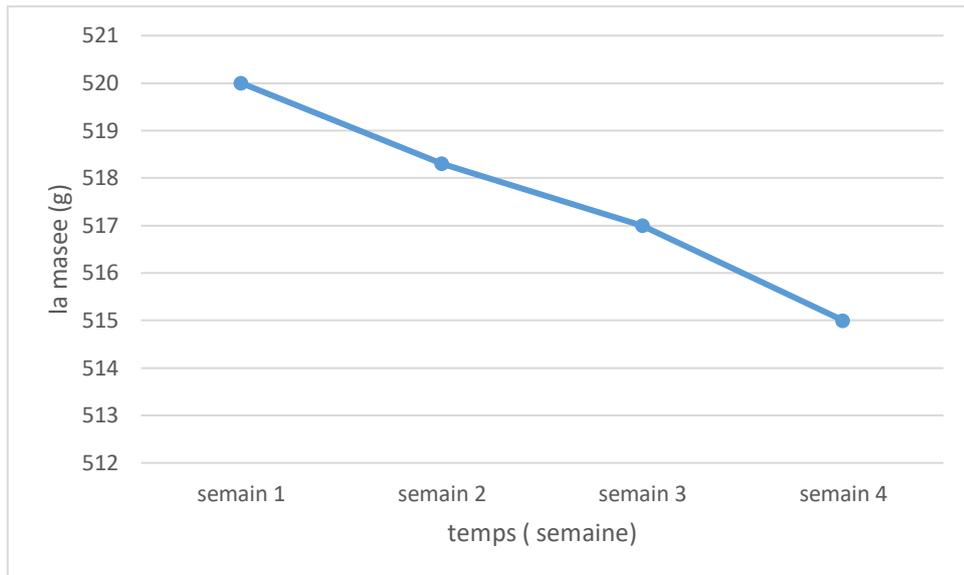


Figure. IV. 24 : perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution H_2SO_4



Figure. IV. 25 : éprouvette du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution H_2SO_4

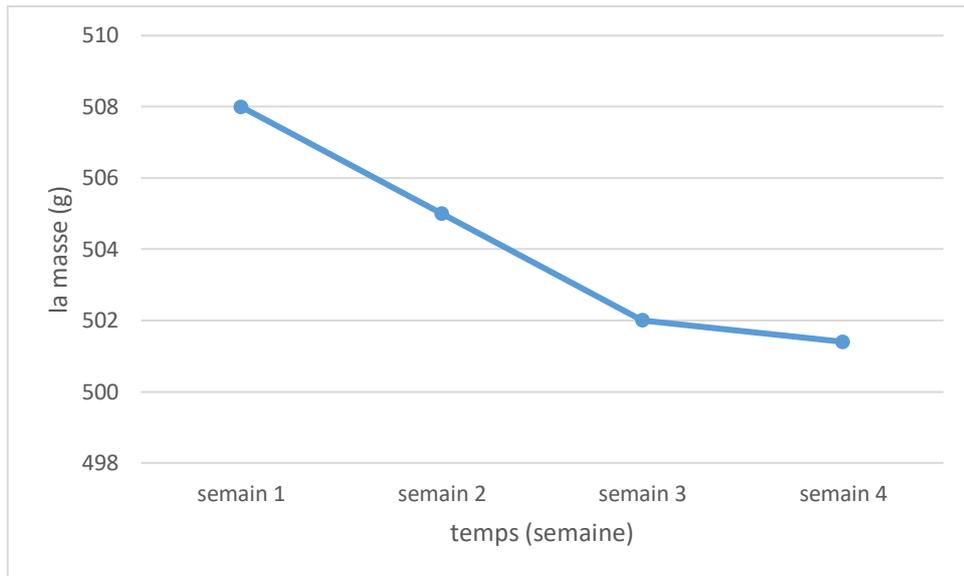


Figure. IV. 26 : perte de masse du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'eau immergée dans la solution H_2SO_4



Figure. IV. 27 : éprouvette du béton avec 15% de la vase calcinée refroidit à l'air immergé dans la solution H_2SO_4

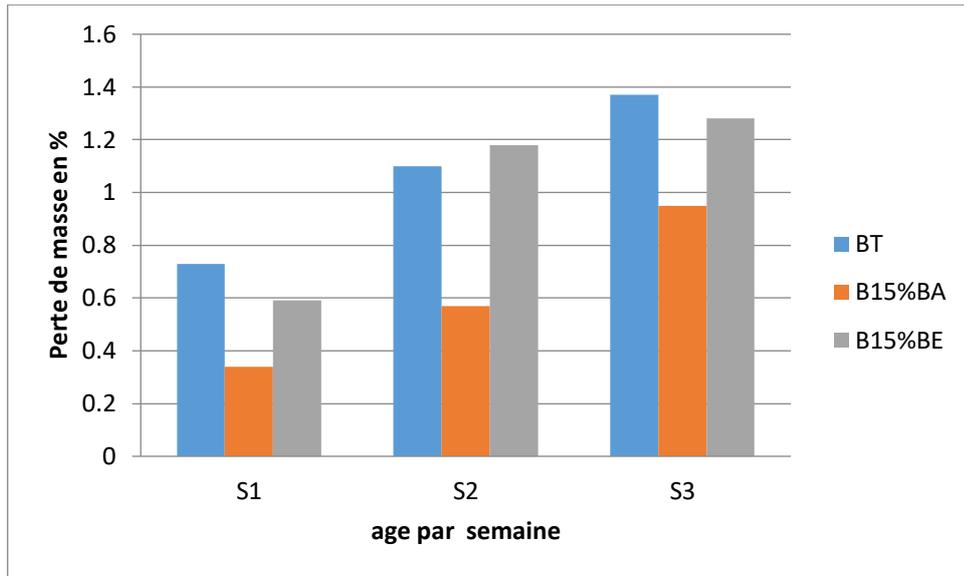


Figure. IV.28 : Histogramme comparatif de la perte de masse en fonction d'âge des bétons immergés dans la solution H_2SO_4

D'après les résultats on remarque que les BAP formulés subit une dégradation de masse, dont BAP T BE_{15%} perd environ 1.3 % de son poids après 21 jours d'immersion alors que le BAP BE_{15%} et BAP BA_{15%} perdent 1.9% et 0.9% de leurs poids respectivement.

On constate aussi que le BAP BA_{15%} résiste mieux à l'attaque de l'acide sulfurique par rapport aux autres bétons

Pour le béton en contact avec l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de calcium, qui est déposé comme gypse.

Pendant que l'attaque se poursuit, tous les composants du ciment sont par la suite décomposés et lixiviés. En outre le sulfate de calcium constitué par la première réaction va réagir avec la phase d'aluminat de calcium dans le ciment pour former le sulfoaluminat de calciumhydraté (ettringite), qui, après cristallisation, peut causer l'expansion du béton. La couche du gypse précipitée est facilement lixiviée conduisant à une perte de masse considérable.[47]

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre étude a permis de confirmer la possibilité de la valorisation de la vase de BENI AMRANE en tant que matériau substituable en partie au ciment. Les principales conclusions sont les suivantes :

1. Les résultats du béton à l'état frais sont conformes aux normes (l'étalement, la boîte en L, la stabilité au tamis). Cela confirme l'idée de la possibilité de valorisation de la vase dans les BAP en général.
2. Les résultats de la résistance à la compression indiquent que le meilleur pourcentage de la vase de BENI AMRANE est de 15 % refroidit à l'air en tant que substitut partiel du ciment.
3. Pour les essais de durabilité, les résultats montrent que la vase améliore la durabilité des BAP.

En général, d'après la partie pratique, on peut conclure que le dosage de 15 % refroidit à l'air donne de bons résultats.

Puisque les résultats de l'application sont satisfaisants et que nous pouvons valoriser la vase dans les BAP nous mentionnons les avantages suivants de ce processus :

L'utilisation de la vase comme matériau de substitution dans le BAP permet de réduire la quantité de ressources naturelles, comme le calcaire et l'argile, nécessaires à la fabrication du ciment. Cela contribue à préserver les ressources naturelles et réduit l'empreinte environnementale de la construction.

La valorisation de la vase permet de traiter un matériau généralement considéré comme un déchet ou un résidu, offrant ainsi une solution de gestion des déchets et contribuant à la réduction des décharges.

En utilisant la vase locale qui est disponible à moindre coût, on peut réduire les coûts de production du BAP. De plus, le BAP lui-même offre des avantages économiques en réduisant les coûts de main-d'œuvre liés à la mise en place du béton.

Le BAP est autoplaçant, ce qui signifie qu'il peut être coulé et réparti de manière plus efficace sans nécessiter de vibrations excessives. L'ajout de vase peut améliorer la fluidité du BAP, facilitant ainsi sa mise en place, en particulier dans des formes complexes ou des zones difficiles d'accès.

L'incorporation de la vase peut améliorer la cohésion du BAP, réduisant ainsi le risque de fissuration pendant le durcissement et la prise. Cela peut augmenter la durabilité et la longévité des structures en béton.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- [1] **AFGC 2008.** « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants », (janvier 2008).
- [2] **OKAMURA H.** «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp. 3-14, 13-15 September 1999.
- [3]**Khayat, K. H.** (1999). Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, 96(3), 346-353.
- [3] European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC). (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*.
- [4]**AFGC 2002.**«Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete», Association Française de Génie Civil, 2002. Association
- [5] **AFGC** « Recommandations provisoires », document scientifique et technique (juillet 2000)
- [6] **SEDRAN T.** «Les Bétons Autonivelants», bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-Avril 1995.
- [8] **TURCRY P.** Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants –Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004
- [9] **ADAM N. VILLE**, « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000.
- [10] **EFNARC**, *Specifications and guidelines for self-compacting concrete*, février 2002.
- [11] **JOSSERAND L.** Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [12] **ADAM N. VILLE**, « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB (Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, SHERBROOKE-LAVAL), septembre 2000
- [13] **YURIGI, SAKATA N, IWAI M, SAKAI G.** (1993), «Mix design for highly workable concrete », Conference concrete 2000, Dundee, 7-9 September, p11.
- [14] **NF EN 934-2**, Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- [15] **AFGC 2002.**«Interim recommendations for use of Self-Compacting Concrete», Association Française de Génie Civil, 2002. Association
- [16] **OKAMURA H.** «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp. 3-14, 13-15 September 1999.
- [17] **OKAMURA H.** «Self-compacting concrete. Development, present and future», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suede, pp. 3-14, 13-15 September 1999.
- [18] **AÏTCIN et AL.**, « L'interaction ciment / superplastifiant. Cas des polysulfonates », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, Juillet-Août 2001, n° 233, pp 87-98.
- [19] **MATSUOKA S.**, «Development of combinaison type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods», *Journal of Advanced Concrete technology*, 2003.
- [20] **BILLBERG P.**, «Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration», Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, October 2001.

- [21] **HAYAKAWA M., MATSUOKA Y. and YOKOTA K.**, «Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan», Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, 1995.
- [22] **PETERSSON Ö, BILLBERG P. and VAN B.K.**, «A model for Self-Compacting Concrete», International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, 1996.
- [23] **Khayat et al. 2015**(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461500278X>)
- [24] **GUILLON.E.**, « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles». Thèse de doctorat, d'école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [25] **Tamayo, E., & Ríos, J. D.** (2019). Durability of SCC containing limestone powder and fly ash in chloride environments. *Construction and Building Materials*, 197, 347-356
- [25] **Khelafi, H., & Kenai, S.** (2012). A review of mechanical properties of self-compacting concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 30, 709-718.
- [26] **R.GANE**, "Cours de durabilité et réparation des bétons (GCI-714)", Chapitre2: La durabilité des bétons. Université de Sherbrooke, Canada, 2002,p.32,www.usherb.ca.
- [27] **GCI – 714** « Cours : Durabilité et Réparations du Béton », Université de Sherbrooke, CANADA, Juillet 2009.
- [28] **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.
- [29] **SIAD HOCINE**, «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
- [30] **étude de l'envasement du barrage d'el-haimeur** et son impact sur la protection de la ville de ghardaia ; presnté par cheriet salah eddine nacer slimane ; mémoire de l'obtention du diplôme de master ; université de ghardaïa ; année universitaire 2021/2022 .
- [31] **rampon a. (1990)** érosion hydrique et sédimentation dans les barrages. informations techniques cemagref, n° 78, note 6, 1-7.
- [32] **demmak a. (1982)** contribution a l'étude de l'érosion et des transports solides en algerie septentrionale. these de docteur-ingenieur, universite de pierre et marie curie. paris xi,323p.
- [33] **badraoui a. et hajji a. (2001)** envasement des retenues de barrages. *rev. int. la houille blanche*, 6-7, 72-75.
- [34] **hallouche w. (2007)** prevision du transport solide et sédimentation des barrages. these de doctorat, universite de biskra, algerie, 105 p.
- [35] **schneider, g., 2001.** boues de curage des cours d'eau. *courr. environ. inra* 43, 146–147.

[36] **ruckelshaus, m.h., mcclure, m.m., 2007.** sound science: synthesizing ecological and socioeconomic information about the puget sound ecosystem. u.s. dept. of commerce; national oceanic & atmospheric administration (nmfs); northwest fisheries science center, seattle, washington.

[37] **De Larrard, F., & Sedran, T. (2002).** Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. Cement and Concrete Research, 32(3), 407-414.

[37] **Kogbara, R. B., Al-Tabbaa, A., & Stegemann, J. A. (2011).** Potential of valorisation of dredged sediments in controlled low-strength materials. Journal of Hazardous Materials, 192(3), 1009-1018.

[37] **Li, X., et al. (2015).** Properties of eco-friendly dredged sediment concrete. Construction and Building Materials, 83, 77-82.

[38] DURABILITÉDES BÉTONS AUTOPLAÇANTS à BASE DE VASE ET DE
POUZZOLANE, BELARIBIOMAR

[39] **MEMOIRE ‘sahali farida et khabou fatima ‘** Elaboration et caractérisation d'un béton autoplaçant avec et sans ajout des sédiments de dragage. University de bouira 2023.

Les normes

[40] **EN 196-3.** norme européenne **Methods** d'essai des ciments Essais pour déterminer les caractéristiques physique :consistance normal ,temps de prise .

[41] **EN 196-6.** norme européenne **Essais** pour déterminer les caractéristiques physique: Masse volumique absolue de ciment et la finesse suivant methode de Blaine.

[42] **NF EN 196-1** norme européenne Août 1995. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques de ciment, flexion et compression.

[43] **NF EN 1907-6.** norme européenne **Essais** pour déterminer les caractéristiques physiques des granulats méthode pour la détermination de la masse volumique absolue et apparente et la détermination de l'absorption.

[44] **NF EN 933-8.** norme européenne Essais pour déterminer les caractéristiques physiques des granulats méthode pour la détermination de l'équivalent de sable.

[45] **NF EN 933-1.** norme européenne Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats

Références bibliographiques

[46]EN 932-2. norme européenne Essais pour déterminer les caractéristiques physiques des granulats Le bleu de méthylène.

[47]NF EN 1097-5et6. norme européenne Essais pour déterminer les caractéristiques physiques de gravier Masses volumiques, le coefficient d'absorption et la teneur en eau.

[48]NF EN 933-3. norme européenne Essais pour déterminer les caractéristiques physiques de gravier -

Coefficient d'aplatissement.

[49]NF EN 1097-2. norme européenne Essai los-Angeles (LA).

[50]EN 196-1 1994. norme européenne Essais pour déterminer la composition de MAP - Formulation de Mortier autoplaçant.

[51]EN 1015-3. norme européenne Essai de mini cone : pour déterminer le diamètre d'étalement du Mortier.

[52]EN 12350-8. norme européenne L'essai d'étalement au cône d'Abrams pour déterminer l'étalement de béton à l'état frais.