

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
جامعة عمّار تليدي بالأغواط  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de technologie



**Département de Génie Civil**

Domaine : Sciences et techniques  
Filière : Génie civil  
Option : Matériaux de construction

**MEMOIRE DE MASTER**

Réaliser par

**REMMA Manel & AROUSSI Ahlem**

Thème

---

**Comportement physico-mécanique  
d'un béton autoplaçant élaboré à base  
de mélange de sable et de tuf calcaire**

---

Soutenue devant le jury composé de

M. BENABED Benchaa	MCA	Président
M. ZIREGUE Ahmed	MAA	Examineur
M. GOUAL Idriss	MCA	Encadreur
M. ELHADJ AISSA Yacine	Doctorant	Co-encadreur

2016-2017

## Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu **Allah** le Miséricordieux qui nous a donné la force, le courage et la volonté d'achever cette modeste réalisation.

Nous adressons nos vifs et sincères remerciements à Monsieur *GOUAL Idriss*, Docteur à l'université Amar Téliidji de Laghouat et Monsieur *HADJ AISSA Yacine*, doctorant à l'université de Laghouat qui ont bien dirigé les étapes d'élaboration de ce mémoire avec leur précieux conseils, leurs compréhensions, et ses aides inestimables. Qu'ils trouvent ici l'expression de toutes nos gratitude.

Nous voudrions remercier Monsieur le docteur *BENABED Benchaa* d'avoir accepté de présider ce mémoire, et Monsieur *ZIREGUE Ahmed* qui a eu le temps d'examiner notre travail, et qui ont honoré ce mémoire. Trouvent ici l'expression de nos profonds respects.

Egalement, nous tenons à remercier tous les enseignants du département de Génie Civil à l'université Amar Téliidji de Laghouat, et en particulier Mme. *DAMENE Z.*, Monsieur le docteur *BELAIDI A. S.* et Monsieur *BOUKHALKHAL A.* ainsi que les doctorantes *DADA H.* et *BENGUETTACHE K.*, qui nous ont soutenus et encouragé durant la réalisation de ce mémoire et pour leur contribution inestimable, trouvent ici tous nos respects.

Nos remerciements à tous ceux qui nous ont soutenus et encouragé, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

## إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى كل من علمني حرفا..  
إلى النور الذي ينير لي درب النجاح.. أبي  
ويا من علمتني الصمود مهما تبدلت الظروف.. أمي  
إلى أخواتي جهاد, بشرى, أنفال، رجاء و إخلاص .  
إلى جدتي أطال الله في عمرها بمزيد من الصحة و العافية.  
إلى روح كل من جدتي و جدي و عمي رحمهم الله برحمته الواسعة ..  
إلى كل من يحمل لقبني عروصي و خروبي .  
إلى كل أساتذتي .. أخص بالذكر منهم الأستاذ قوال إدريس و الأستاذة  
الضامن زينب.  
إلى زملائي وزميلاتي... منال، أمينة، رقية و عبد الحكيم.  
إلى كل من قدم يد العون لي من قريب أو من بعيد و أخص بالذكر منهم ابنة  
خالي فاطمة، دادة الحاجة و شلغوم بلال .. شكرا جزيلا

إليك أيها القارئ.

احلام عروصي

كن عالما ... فان لم تستطع فكن متعلما . فان لم تستطع فاحب العلماء . فان لم تستطع فلا تبغضهم

أهدي هذا العمل المتواضع الى :

الى امي وابي الغاليان على قلبي اللذان سهرا الليالي وتعبا على تربيته

الى اخواني وزوجاتهم واخواتي اجمع وبالأخص محمد الامين، بشرى، جمال،

والى كل اولاد اخواني واخواتي اجمع وبالأخص حبيب قلبي وسيم

الى روح عمي العزيز وجدتي الغالية وأخي الحنون وعماتي ربي يرحمهم

الى خالاتي واخوالي وزوجاتهم وكل اولادهم وكل عائلة قلومة

الى اعمامي وزوجاتهم وعماتي وكل اولادهم وكل عائلة الرمة

الى اصدقائي: سارة، هاجر، حسناء، نسرين، احلام، لاميا، خليفة، طاهر، بدر

الدين، عبد الحكيم، عبد القادر، عبد السلام، فاروق هشام، سارة، اسماء، مراد،

اسامة والى كل من يعرفني من بعيد وعن قريب لكم كل تحياتي.

و اهداء خاص للأستاذتي العزيزة ضامن زينب و منير الرمة

الرمة منال



## ملخص

يهدف هذا العمل في المساهمة في تفعيل الطيف الجيري المتواجد بوفرة بمنطقة الأغواط، وذلك بغرض توسيع نطاق استخدامه في مجالات مواد البناء.

وفي هذا الضوء أطر عملنا وهو دراسة السلوكيات الفيزيائية والميكانيكية لخرسانة ذاتية التوضع المتكونة من خليط رمال الوادي و الطيف الجيري المحلية لمنطقة الأغواط.

في المرحلة التجريبية الأولية وعلى أساس النتائج المتحصل عليها من خلال الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للمواد المستعملة, سمحت بتحديد نسبة الحبيبات الدقيقة للطيف الجيري و ايضا نسبة الرمل / الملدن.. من ثم المرحلة الثانية على الرمال الجيرية و فيها يتم تحديد أربع خلطات من رمل الوادي و الطيف الجيري التي يمكنها تحقيق خصائص الخرسانة الطازجة وقدرة مرور ومقاومة الفصل العنصري، و تحقيق أقصى قدر ممكن من المقاومة لتجريبية(الضغط البسيط و الشد البسيط)، واختبار قتال وامتصاص مجموع الغمر.

وقد سمح المنهج التجريبي المعتمد على خلط الطيف الجيري مع رمل الوادي بتلبية متطلبات التنمية المستدامة مع الأخذ بعين الاعتبار المعوقات الاقتصادية و البعد البيئي ، و ذلك بمحاولة خلق تكامل بينها.

**الكلمات المفتاحية:** الطيف الجيري المحلي , رمل الوادي ,الخرسانة ذاتية التوضع ,الحبيبات الدقيقة للطيف الجيري .

## Résumé

L'objectif de ce travail est de contribuer à la valorisation de tuf calcaire de la région de Laghouat qui se trouve en abondance, en vue de d'étendre leur utilisation dans d'autre domaine de génie civil (domaine de bâtiment). C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux. Il s'agit d'étudier le comportement physico-mécanique d'un béton auto plaçant élaboré à base de mélange sable alluvionnaire tuf calcaire de la région de Laghouat. Une première phase expérimentale basée sur la formulation des mortiers autoplaçant, porte sur l'optimisation de pourcentages de fines de tuf calcaires avec un S/M variant. Après la fixation du rapport Sable/Mortier et le pourcentage de fine une deuxième phase substitution concernant le sable alluvionnaire par le sable de tuf calcaire est entamé. La second phase expérimentale consiste (basculément des mortiers autoplaçant vers des BAP) à étudier le comportement des différents bétons autoplaçants formulés à l'état frais (rhéologie) vis-à-vis l'étalement, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation, et à l'état durci vis-à-vis des résistances à la compression simple, les essais d'absorption par capillarité et l'absorption par immersion total.

La démarche expérimentale adoptée a permis de monter que l'association de sable alluvionnaire et de tuf calcaire satisfait à la formulation un béton autoplaçant mécaniquement performant comparable au BAP ordinaire, et répond aux exigences de la politique du développement durable dans l'esprit d'un complément entre la contrainte économique et la dimension environnementale.

**MOTS CLES :** tuf calcaire, sable alluvionnaire, comportement mécanique, matériaux locaux.

## Abstract

The objective of this work is to contribute to the valuation of calcareous tufa of the Laghouat region which is in abundance, with a view to extending their use in other civil engineering field (building field). This was the focus of our work. It is a matter of studying the physic-mechanical behavior of an elaborate self-placing concrete based on a mixture of alluvial sand and calcareous tufa of the Laghouat region. A first experimental phase based on the formulation of self-placing mortars, concerns the optimization of percentages of fines of calcareous tuf with a varying S / M. After the Sand / Mortar ratio has been set and the percentage of fine a second substitution phase concerning the alluvial sand by the calcareous sand is started. The second experimental phase consists in the study of the behavior of the different self-laying concretes formulated in the fresh state (rheology) with regard to the spreading, the capacity of passage and the resistance to the segregation , And in the cured state with respect to the simple compression resistances, the capillary absorption tests and the total immersion absorption.

The experimental approach adopted shows that the association of alluvial sand and calcareous tuf satisfies the formulation a self-compacting concrete mechanically performing comparable to ordinary BAP and meets the requirements of the policy of sustainable development in the spirit of a Complement between economic and environmental constraints.

**KEY WORDS:** limestone tuff, alluvial sand, mechanical behavior, local materials.

**Liste des tableaux.**

**Chapitre II :**

<b>Tableau II. 1</b> Les résultats de caractérisation des matériaux utilisés .....	45
<b>Tableau II. 2</b> les résultats de l'essai VB .....	46
<b>Tableau II. 3</b> résultats à la traction et à la compression de l'indice d'activité.....	48

## Listes des figures.

### Chapitre I :

Figure I. 1 cône à mortier .....	25
Figure I. 2 Entonnoir à mortier.....	25
Figure I. 3 Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).....	27
Figure I. 4 Représentation schématique de l'essai d'étalement.....	28
Figure I. 5 Représentation schématique de l'essai à la boîte en L .....	29
Figure I. 6 Représentation schématique de l'essai stabilité au tamis .....	30
Figure I. 7 Variation de l'affaissement par rapport à pourcentage de tuf (Cherrak et al., 2013) .....	36
Figure I. 8 Variation du rapport E/C en fonction du pourcentage de tuf calcaire (Zaidi et Souiah, 2015) .....	36
Figure I. 9 Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du pourcentage de tuf calcaire (a) sans ajout de superplastifiant (b) avec ajout de superplastifiant (cherrak et al, 2013).....	37
Figure I. 10 Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du pourcentage de tuf calcaire (a) à l'air libre (b) sous l'eau (Souiah et zaidi ,2011 .....	38

### Chapitre II :

<b>Figure II. 1</b> Courbe granulométrique des matériaux utilisée (tuf, sable, graviers).....	42
<b>Figure II. 2</b> l'essai de l'étalement au mini- cône <b>Figure II. 3</b> l'essai de l'écoulement au V-funnel .....	49
<b>Figure II. 4</b> Schéma de l'essai d'absorption d'eau par capillarité .....	59

### Chapitre III :

Figure III. 1 Etalement des mortiers en fonction du dosage en fines tuf calcaire pour différents rapports S/M .....	65
Figure III. 2 Temps d'écoulement des mortiers en fonction du dosage en Ftc pour différents rapports S/M .....	66
Figure III. 3 Etalement des MAP en fonction du pourcentage de Stc .....	68
Figure III. 4 temps d'écoulement des MAP en fonction du pourcentage de Stc ....	69
Figure III. 5 Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge pour les six bétons de conservation sous l'eau.....	70
Figure III. 6 variation de la résistance à la compression aux différents âges .....	70
Figure III. 7 Etalement des BAP en fonction de dosage en Stc .....	72
Figure III. 8 Temps d'écoulement des BAP en fonction de dosage en Stc.....	73
Figure III. 9 les résultats d'essai L-Box.....	74
Figure III. 10 les résultats d'essai Ségrégation au tamis .....	75

## Liste des Photos

### Chapitre I :

<b>Photo I. 1</b> Réalisation de dédoublement RN 01 entre LAGHOUAT-GHARDAIA .....	34
---	----

### Chapitre II :

<b>Photo II. 1</b> Analyse granulométrique de sable et graviers .....	41
<b>Photo II. 4</b> Essai Equivalent de sable.....	44
<b>Photo II. 5</b> L'essai bleu de méthylène.....	46
<b>Photo II. 6</b> Essai l'indice d'activité .....	47
<b>Photo II. 7</b> l'essai d'étalement au mini cone.....	52
<b>Photo II. 8</b> L'essai d'écoulement au V-Funnel.....	52
<b>Photo II. 9</b> l'essai de l'étalement au cône d'Abrams.....	53
<b>Photo II. 10</b> l'essai de l'écoulement en V_Funnel .....	54
<b>Photo II. 11</b> l'essai de la courone J-Ring .....	55
<b>Photo II. 12</b> l'essai de la boite en L ( L-Box).....	56
<b>Photo II. 13</b> l'essai de stabilité au tamis .....	56
<b>Photo II. 14</b> Résistance à la traction par flexion trois point.....	57

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des tableaux.

Listes des figures.

Liste des photos

Introduction Général

## Chapitre I Etude bibliographique

<b>I. Les bétons autoplaçant .....</b>	<b>16</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>16</b>
<b>2. Historique des bétons Autoplaçant .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Définition du béton Autoplaçant .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Les principaux constituants des BAP .....</b>	<b>17</b>
4.1. Matériaux de base .....	18
4.1.1 Les granulats.....	18
4.1.2. Le ciment .....	18
4.1.3. L'eau de gâchage .....	19
4.2. Additions minérales .....	19
4.3. Adjuvants chimiques.....	20
4.3.1 Les superplastifiant .....	20
4.3.2. Les agents colloïdaux .....	21
4.4. Autres additions .....	22
<b>4. formulation des bétons autoplaçant .....</b>	<b>22</b>
4.1. Méthodes de formulation .....	23
4.1.1. Pratique actuelle de la formulation des BAP .....	23
4.1.2. Méthode japonaise proposée par Okamura et al [21] .....	24
4.1.3. Méthode française (laboratoire central de ponts et chaussées (LCPC) : proposée par De Larrad et al [22] .....	25

4.1.4. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire [23]	26
5. Caractérisations des BAP à l'état frais.....	27
5.1. Essai d'étalement.....	28
5.2. Essai de boîte en L.....	28
5.3. Essai de stabilité au tamis.....	29
6. Caractérisation des BAP à l'état durci.....	30
6.1. La résistance mécanique.....	30
7. Domaines d'application.....	31
8. Les innovations des BAP.....	32
II. LES TUFs.....	33
1. Définitions des tufs.....	33
1.2. Les tufs dans le domaine de travaux publics et de Génie Civil.....	33
1.2.1. Utilisation des tufs en corps de chaussée.....	33
1.2.2. Utilisations des tufs calcaires en génie civil.....	34

## Chapitre 2 Caractérisation des matériaux et Protocol expérimental

1. Introduction.....	40
2. Matériaux de base.....	40
2.1. Localisation des matériaux.....	40
3. Caractérisation des matériaux.....	41
3.1. Caractéristiques physiques.....	41
3.1.1. Analyse granulométrique.....	41
3.1.2. Module de finesse (Mf).....	42
3.1.3. Masse volumique.....	43
3.1.4. Coefficient de l'absorption des granulats NF P 18-555.....	43
3.1.5. Equivalent de sable.....	44
3.1.6. Essai Bleu de méthylène.....	45
3.1.7. L'indice d'activité.....	47

<b>4. Formulation de béton autoplaçant « BAP »</b> .....	<b>48</b>
3.1. Formulation du mortier auto plaçant « MAP ».....	48
3.1.1. Rapport Eau/Liant (E/L) .....	49
3.1.2. Rapport Sable/Mortier (S/M) .....	50
3.1.3. Dosage de Super plastifiant (Sp).....	50
3.2 Formulation du BAP.....	50
3.2.1. Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) .....	51
3.2.2. Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Liant (E/L) ..	51
<b>5. Protocol expérimental</b> .....	<b>51</b>
4.1 Essais sur MAP à l'état frais	51
4.1.1. Essai d'étalement au Mini-cône .....	51
4.1.2. Essai de l'entonnoir en V (V-funnel).....	52
4.2. Essais sur BAP à l'état frais	53
4.2.1. Essai d'étalement (Flow test) .....	53
4.2.2. Essai temps d'écoulement en V (V-funnel test).....	54
4.2.3. Essai de la courone J ( J-Ring test).....	54
4.2.4. Essais de la boîte en L (L-Box test) .....	55
4.2.5. Essai de stabilité au tamis (Résistance à la ségrégation).....	56
4.3. Essai BAP à l'état durci	57
4.3.1. Résistance à la traction par flexion trois points .....	57
4.3.2. Absorption capillaire.....	58
<b>5. Conclusion</b> .....	<b>60</b>

## **Chapitre 3 Analyse des résultats et discussion**

<b>1.Introduction</b> .....	<b>66</b>
<b>2. Etude rhéologique et comportement mécaniques des MAP</b> .....	<b>67</b>
2.1. Comportement à l'état frais des MAP .....	67
2.1.1. Substitutions du ciment par des Ftc.....	67
2.1.1. Substitutions du sable alluvionnaire (SA) par le sable de tuf calcaire (Stc).....	69
2.2. Comportement à l'état durci des MAP .....	72
2.2.1. Résistance a la compression simple.....	72
<b>3. Rhéologie et comportement physico-mécaniques des BAP</b> .....	<b>74</b>

3.1.1.	L'effet de sable de tuf calcaire sur l'étalement .....	74
3.1.2.	L'effet de sable de tuf calcaire sur le temps d'écoulement	75
3.1.3.	Essai de la Boîte en L (L-Box) .....	76
3.1.4.	Stabilité au tamis.....	77
3.2.	Comportement physique et mécanique d'un BAP .....	78
3.2.1.	Résistance à la compression simple.....	78
3.2.2.	Absorption par capillarité.....	79
3.2.3.	Absorption par immersion total .....	79
4.	Conclusion .....	80

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis des années, la valorisation des matériaux locaux tels que les tufs, les matériaux volcaniques, les sables, dans le domaine du bâtiment et de travaux publics reste un thème d'actualité : il s'agit de mieux maîtriser leur comportement et leur mise en œuvre dans diverses situations afin de satisfaire le besoin énorme en matériau de qualité et de contribuer au développement durable.

En Algérie, les tufs d'encroûtement calcaires ont servi depuis plus d'un demi-siècle à la construction de milliers de kilomètres de routes économiques et de désenclavement. Ces matériaux couvrent approximativement une superficie de 300.000 km<sup>2</sup>. Ils sont utilisés comme des agrégats de substitution économique extraits de gisements calcaires, gypseux ou gypso calcaires.

L'utilisation de ces matériaux dans le domaine de Génie Civil, concernant la fabrication des bétons, est rare ou même inexistant, à part quelques travaux de recherche entamés dans ce sens, concernant l'utilisation des tufs dans la fabrication des bétons ordinaires, ont permis de juger le potentiel des tufs calcaires dans le domaine de construction en Génie Civil.

Le présent travail entre dans le cadre de la continuité de ces travaux de recherche. Il présente une contribution à la valorisation de tuf calcaire de la région de Laghouat qui se trouve en abondance, en vue de l'étendre leur utilisation dans d'autres domaines de génie civil (domaine de bâtiment). Il s'agit d'étudier le comportement physico-mécanique d'un béton auto plaçant élaboré à base de mélange sable alluvionnaire tuf calcaire de la région de Laghouat. L'objectif de cette étude est double : (i) minimiser l'exploitation abusive du sable alluvionnaire par leur substitution par le sable de tuf calcaire ; (ii) minimiser le coût de fabrication de ciment par leur substitution par des fines de tufs calcaires. Cette idée peut s'avérer intéressante, d'un point de vue économique et environnemental.

L'étude est subdivisée en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur l'état actuel des connaissances de tuf calcaires et une généralité sur les bétons autoplaçants.

Dans le second chapitre, on a présenté le choix des matériaux utilisés, les essais préliminaires de leurs caractérisations physico-mécaniques. Par la suite, les essais de formulation du BAP à base de mélange tuf – sable alluvionnaire sont présentés.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation et analyse des résultats, du deuxième chapitre. L'étude du comportement physico-mécanique des différents BAP formulés, est discutée, vis-à-vis la résistance à la compression et à la traction. En fin les résultats des essais d'absorption par capillarité et total sont critiqués.

En fin, ce travail est clôturé par une conclusion générale ainsi que quelques recommandations et des perspectives.

# Chapitre I

## Etude bibliographique

---

<b>I. Les bétons autoplaçant.....</b>	<b>16</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>2. Historique des bétons Autoplaçant .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Définition du béton Autoplaçant .....</b>	<b>17</b>
<b>4. Les principaux constituants des BAP .....</b>	<b>17</b>
4.1. Matériaux de base .....	18
4.2. Additions minérales .....	19
4.3. Adjuvants chimiques.....	20
4.4. Autres additions .....	22
<b>4. formulation des bétons autoplaçant .....</b>	<b>22</b>
4.1. Méthodes de formulation .....	23
<b>5. Caractérisations des BAP à l'état frais .....</b>	<b>27</b>
5.1. Essai d'étalement .....	27
5.2. Essai de boîte en L .....	28
5.3. Essai de stabilité au tamis.....	29
<b>6. Caractérisation des BAP à l'état durci .....</b>	<b>30</b>
6.1. La résistance mécanique.....	30
<b>7. Domaines d'application.....</b>	<b>31</b>
<b>8. Les innovations des BAP.....</b>	<b>32</b>
<b>II. LES TUFs.....</b>	<b>33</b>
<b>1. Définitions des tufs .....</b>	<b>33</b>
1.2. Les tufs dans le domaine de travaux publics et de Génie Civil .....	33

---

# I. Les bétons autoplaçant

## 1. Introduction

Les bétons autoplaçant (BAP, ou SCC, en anglais, self compacting concrète) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [1].

Ces bétons se développent maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : possibilité de bétonner les zones fortement ferraiillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du parement (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps et de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part [2].

## 2. Historique des bétons Autoplaçant

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Köchi (Tokyo) Ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2ème Congrès de l'Asie de l'Est et pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4ème Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. Ozawa a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [3].

### 3. Définition du béton Autoplaçant

Un béton autoplaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les critères caractérisant un béton autoplaçant sont :

- les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixés dans la fourchette 60 cm à 75 cm (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréole de laitance ou amoncellement de gros granulats au centre) ;
- le taux de passage à la boîte en L doit être supérieur à 0,8.
- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée. L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante.

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques :

- Le remplissage ;
- La résistance à la ségrégation ;
- La capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [4]; [5].

### 4. Les principaux constituants des bétons autoplaçants

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO par leurs proportions, que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment,

granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques [3].

#### 4.1. Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puis qu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

##### 4.1.1 Les granulats

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique.

Masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, tant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé. Partir de plusieurs fractions [3].

#### **4.1.2. Le ciment**

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales [3].

#### **4.1.3. L'eau de gâchage**

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton autoplaçant. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton.

Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'autoplaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants [3].

#### **4.2. Additions minérales**

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées.

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

- Les fillers calcaires
- Les pouzzolanes naturelles
- Le laitier de haut fourneau
- La fumée de silice
- Les cendres volantes,...

### 4.3. Adjuvants chimiques

Afin d'obtenir une très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant utilise généralement un adjuvant fluidifiant de la dernière génération, base de poly carboxylates.

Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient donc de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires sinon, il faut s'attendre à devoir recourir à des dosages. Élevés en adjuvants, voire à l'apparition d'un raidissement prononcé. Avec perte des performances recherchées du BAP.

#### 4.3.1 Les superplastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée.

Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du poly naphthalène sulfoné, et les sels de sodium de la poly mélamine sulfonée. Les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché.

Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit :

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume

d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

Les superplastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité [3].

#### **4.3.2. Les agents colloïdaux**

En 1977, des agents colloïdaux améliorant la viscosité et la stabilité du béton ont été développés en Allemagne. Ces adjuvants, se présentant généralement sous forme de poudre, sont fréquemment utilisés pour empêcher le dévalement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau, comme agent de pompage, et pour améliorer la cohésion de mélange des BAP. Leur utilisation commence à être populaire, mais ils sont actuellement relativement chers comparés aux autres adjuvants.

La plupart des agents colloïdaux sont composés d'éther de cellulose ou de polymères de type acrylique qui sont solubles dans l'eau. Ils sont classés selon leur origine en trois catégories [10] :

- Polymères naturels : Ils comprennent des gommes naturelles, des protéines de certaines plantes et l'amidon.
- Polymères semi-synthétiques : Ils comprennent des dérivés de l'amidon, des dérivés de l'éther de cellulose comme l'hydroxyle de cellulose, l'hydroxyle de méthyle de propylée de cellulose et le méthyle carboxyle de cellulose, ainsi qu'un électrolyte comme de l'aliments de sodium.
- Polymères synthétiques : Ils comprennent de l'éthylène comme de l'oxyde de polyéthylène et de vinyle comme l'alcool de polyvinyle.

Le mécanisme d'action des agents colloïdaux est fonction du type et de la concentration des polymères. Il peut être décomposé en trois phases:

- Adsorption : Les longues chaînes de polymères adhèrent à la périphérie des molécules d'eau par un phénomène d'adsorption et fixation d'une partie de l'eau. La quantité d'eau adsorbée dépend de la longueur des polymères et de leur surface spécifique.
- Association : Les molécules des chaînes de polymères adjacentes peuvent développer entre elles des forces d'attraction qui bloquent les mouvements de l'eau et provoquent la formation d'un gel qui augmente conséquemment la viscosité.
- Entrelacement : Les chaînes de polymère peuvent s'entrelacer et s'emmêler spécialement dans des mélanges à forte concentration d'agent colloïdal. Cet entrelacement augmente la viscosité.

#### 4.4. Autres additions

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées :

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

### 4. formulation des bétons autoplaçant

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux de la gâchée, c'est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable.

Pour les BAP, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être en balance pour obtenir un bon BAP.

## 4.1. Méthodes de formulation

### 4.1.1. Pratique actuelle de la formulation des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux - Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE, est notamment l'industrie des bâtiments, qui utilisent principalement des bétons de 25 à 35 MPA. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût, avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formateurs [6].

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux- Gorisse, avec une courbe

granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

#### **4.1.2. Méthode japonaise proposée par Okamura et al [7]**

Le principe de cette méthode est le suivant :

- la teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50 % du volume du solide
- le volume du sable est fixé à 40% du volume total du mortier
- l'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40 %
- l'eau, superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir figure 1) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône figure 2).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et temps d'écoulement relatif sont donnés par les équations suivantes :

$$D = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d^2} \qquad T = \frac{10}{t_e}$$

D : Etalement relatif

D : est le diamètre de la galette et d<sub>0</sub> la base du cône (en cm).

T : écoulement relatif (seconde -1)

t<sub>e</sub> : le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en seconde.

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

$D = 10, T = 1$  (S-1)

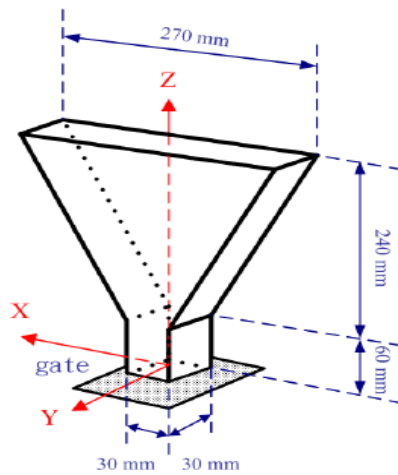


Figure I. 1 cône à mortier

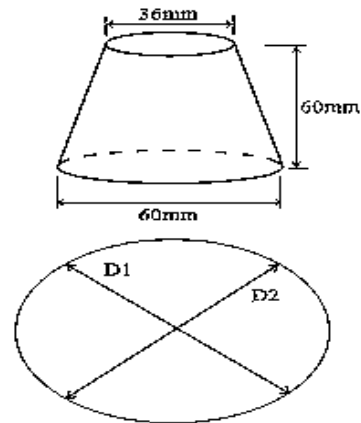


Figure I. 2 Entonnoir à mortier

#### 4.1.3. Méthode française (LCPC)

De Larrad et al. [8] ont proposés au LCPC, un modèle mathématique développé à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

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

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

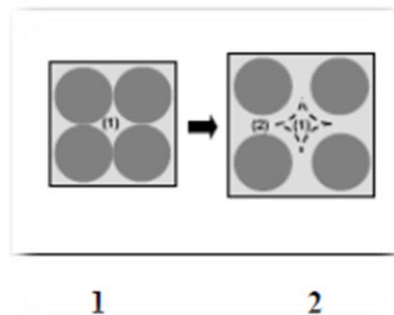
- la proportion du liant et fixée à priori (70% du ciment, 30% d'addition par exemple).
- le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé, selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence de superplastifiant) est déterminé.

- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant en compte du confinement (effet de Paroi)
- La viscosité est fixée de manière arbitraire, La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion (liant / filler) est maintenue constante. Les proportions (granulats / phase liante) sont optimisées.

#### 4.1.4. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire [9]

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Dans ce cas le béton est considéré ici comme un mélange bi - phasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte, dans le cas des BAP, la pâte joue un rôle prédominant. C'est alors que la notion d'excès de pâte est introduite, comme mentionnée sur la Figure I-3, la formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.



**Figure I. 3** Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)

DE LARRAD et al [8], ont développé un model décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le model permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de

serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton frais.

## **5. Caractérisations des BAP à l'état frais**

Les bétons autoplaçant sont des matériaux encore relativement nouveaux au monde de construction, les caractéristiques les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité et la résistance envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant à la mesure de l'étalement (Slump Flow) [10].

En France, trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000, pour l'Association Française de Génie Civil [11], ces recommandations sont devenues sur site les essais de références pour valider une formule de BAP. Ces trois essais sont :

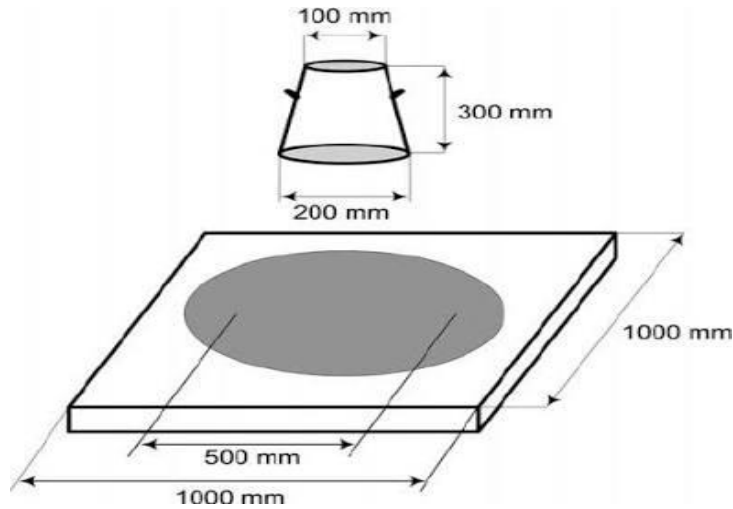
L'essai d'étalement, l'essai à la boîte en L et, l'essai de stabilité au tamis [12].

### **5.1. Essai d'étalement**

Pour la détermination de l'étalement (SLUMP FLOW) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante ( $\geq 800$  par 800 mm), puis il est rempli de BA. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm [10]. Pour l'AFGC les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm. Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du

béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté T50) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton.

Les figures suivantes représentent d'une façon claire l'essai de l'étalement.



**Figure I. 4 Représentation schématique de l'essai d'étalement**

## 5.2. Essai de boîte en L

Il permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage

Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L (Figure I.2).

La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe. L'AFGC [11] recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm. Le mode opératoire de l'essai à la L-Box est le suivant : la partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 L).

Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport H2/H1 permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

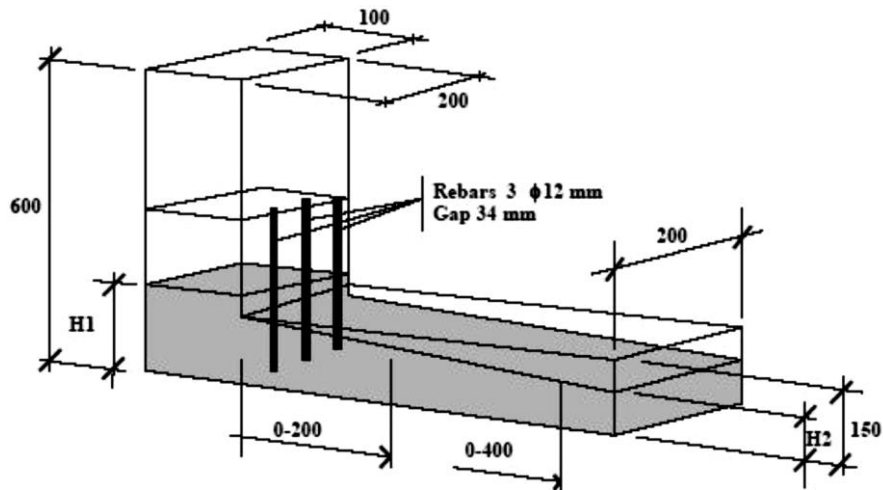


Figure I. 5 Représentation schématique de l'essai à la boîte en L

### 5.3. Essai de stabilité au tamis

La qualification des bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation est visé par cet essai, qui est d'une simplicité lui permettent d'être utilisé en phase d'étude de formulation en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Il consiste à verser 10 litres de béton juste après le malaxage dans un sceau couvert pour protéger le béton de la dessiccation ; après 15 minutes, on verse au centre d'un tamis de 5 mm d'ouverture un poids de béton égal à 5 kg, avec une hauteur de chute du béton de 50 cm ; après 2 minutes on calcule le poids de la laitance passé au tamis, ce qui nous permet de nous situer vis-à-vis des risques de ségrégation et de ressuage.

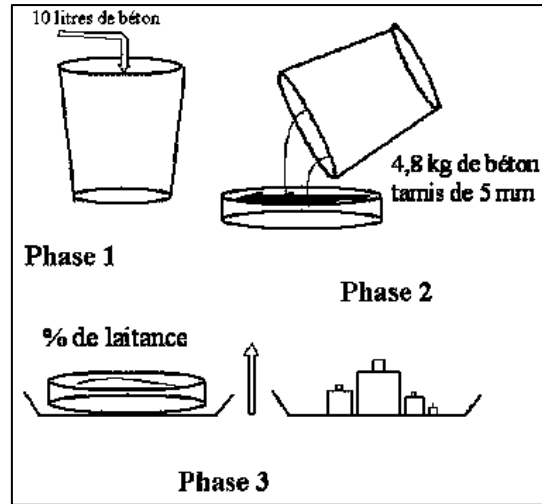


Figure I. 6 Représentation schématique de l'essai stabilité au tamis

## 6. Caractérisation des BAP à l'état durci

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

### 6.1. La résistance mécanique

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable) [13].

D'une façon expérimentale les BAP impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques.

[14] ont fait des tests comparant les BAP aux traditionnels BHP, ils ont remarqué que les résistances en compression des BAP et BHP sont remarquables[15], rapporté par [22] ont fait des tests en comparant Les BAP aux bétons de références sur des éléments standards, ils ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des BAP et du béton vibré.

Par contre [12] observe que la résistance à la traction à 28j pour les BAP conservés dans l'eau est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

[16], comme nous avons vu au premier chapitre sur une série de six mélanges de béton, il a trouvé que la courbe de la résistance en compression du BAP, après le dixième jour se coïncide avec celle du BO. De même il a trouvé que la résistance en traction du BAP est supérieure à celle du BO.

## **7. Domaines d'application**

Le BAP constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation. Comparé au béton vibré, les arguments en faveur du BAP sont les suivants :

- Rendements améliorés et exécution plus rapide
- Réduction des nuisances sonores durant l'exécution
- Liberté accrue des formes de coffrage
- Facilité de bétonnage d'éléments exigus
- Qualité accrue des surfaces de béton
- Réduction/suppression des travaux de ragréage
- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- Remplissage de parties difficilement accessibles

- Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.

Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le béton BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton.

## 8. Les innovations des BAP

À la différence des bétons à haute performance, qui demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels, les BAP se vulgarisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. Leur production reste minime de 1 à 4 % du volume total, mais les BAP ont les atouts nécessaires à la consolidation de leur développement actuel, entre autres, on peut citer :

- La mise en place des BAP est grandement facile et peut généralement être réalisée par un seul ouvrier, même dans le cas de volumes importants donc, il est raisonnable de penser que la main d'œuvre nécessaire serait moindre.
- La suppression de vibration permet de limiter la consommation d'énergie tout en réduisant les nuisances sonores pour l'environnement, en conséquence, les délais d'exécution et le coût global des constructions pourraient ainsi être moindres.
- La grande maniabilité assure la fabrication d'ouvrages dont la finition est toujours d'une qualité acceptable. Par ailleurs, l'obtention d'une meilleure qualité de BAP est pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation, cela va dans le sens d'une durabilité accrue.

Comme les BAP pourraient être coulés dans n'importe quelle forme et taille des coffrages, les architectes peuvent désormais exploiter des modèles complètement nouveaux pour des structures élégantes

## II. LES TUFFS

### 1. Définitions des tufs

Dans la bibliographie, les tufs encroutement se définissent comme étant des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleur claire. Elles datent du quaternaire et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation. Suivant leur composition chimique, les tufs d'encroutements se groupent en trois catégories ; les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes. [17]

#### 1.2. Les tufs dans le domaine de travaux publics et de Génie Civil

Les tufs d'encroutements constituent une ressource en matériaux routières particulièrement intéressante et économique pour de nombreux pays à climat aride ou semi-aride.

Ces matériaux présentent, lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, un comportement bien meilleur que ne laisseraient supposer leurs caractéristiques géotechniques, si on les compare aux spécifications des pays tempérés.

En ALGERIE, depuis près d'un demi-siècle, des milliers de kilomètres de routes économiques, de désenclavement ont été réalisés, dans l'ensemble avec succès, en tufs d'encroutement (ex : utilisation en corps de chaussée de la RN 1 entre LAGHOUAT et GHARDAIA). Ces matériaux couvrent la totalité du réseau routier algérien en zone aride et semi-aride [17].

##### 1.2.1. Utilisation des tufs en corps de chaussée

Les tufs calcaires sont utilisés en technique routière selon leur qualité. Ils sont utilisés le plus souvent sous forme de granulats non liés pour la construction des chaussées (couche de base et couche de fondation)[17], d'autres usages sont fréquents : accotements, couche de forme, pistes agricoles, etc.

En 1956, sur la RN 1 entre LAGHOUAT et GHARDAIA, les ingénieurs ont innové en saupoudrant une couche de base, un macadam classique, avec du tuf calcaire. La route a bien tenu malgré un trafic relativement élevé. Par la suite, les tufs bruts ont été utilisés en couche de base et la préférence a été donnée, aux tufs à squelette qui se rapprochent le plus de la grave concassée.

La photo I-1 présente l'utilisation et stockage du tuf concernant l'opération de réalisation de dédoublement RN 01 entre LAGHOUAT – GHARDAIA sur 103 km, qui constitue un vecteur de développement et de désenclavement des régions traversées, et un facteur de promotion des échanges avec les pays voisins, et c'est pour cette raison qu'elle a été baptisée « Route de l'Unité Africaines ».



**Photo I. 1** Réalisation de dédoublement RN 01 entre LAGHOUAT-GHARDAIA

### 1.2.2. Utilisations des tufs calcaires en génie civil

L'utilisation de tuf calcaire dans le domaine de génie civil est très rare mais on peut considérer comme une perspective de recherche dans le développement de ce domaine. A titre d'exemple, nous citons les travaux Zaidi Feriel et Souiah Siham (2015) [18] et de Cherrak et al (2013) [19]. Ces recherches, ont examinés les effets de tufs calcaires sur les propriétés physicomécaniques du béton adjuvanté et non adjuvanté.

Pour Cherrak et al (2013) [19], ont réalisé une substitution partielle du sable alluvionnaire par de tuf calcaire, avec des pourcentages variables de [5 à 35%], de deux gisements du nord Algérien (le tuf de Htattba et le tuf de Boughezoul) pour la formulation d'un béton ordinaire sans et avec ajout

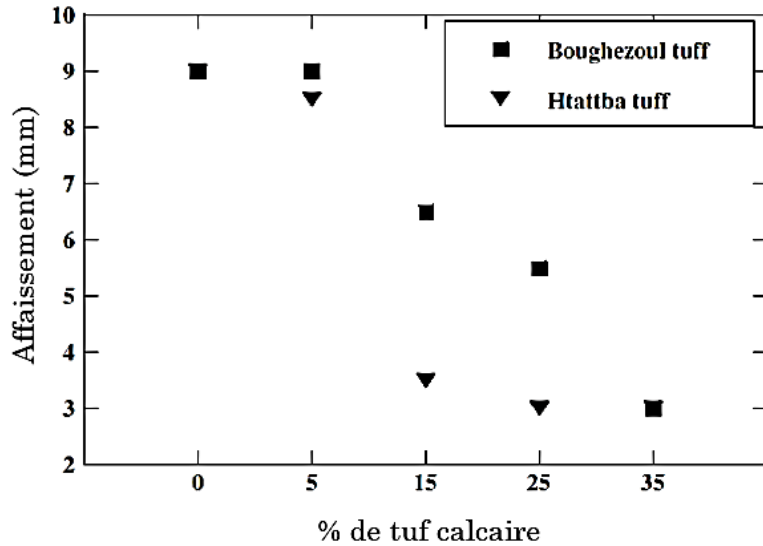
de superplastifiant pour un rapport E/C constant. Les auteurs, ont étudiés le comportement mécanique vis-à-vis la résistance à la compression et à la traction, et la durabilité vis-à-vis l'absorption d'eau (totale et capillaire) et la résistance aux attaques des acides.

Concernant Zaidi et Souiah (2015) [18], ont réalisé une substitution partielle de sable alluvionnaire par de tuf calcaire de la région de Laghouat avec des pourcentages variables (0-50%), pour la formulation d'un béton ordinaire non adjuvanté. Ils ont étudiés le comportement des différents bétons formulés, vis-à-vis la résistance à la compression et la traction par flexion.

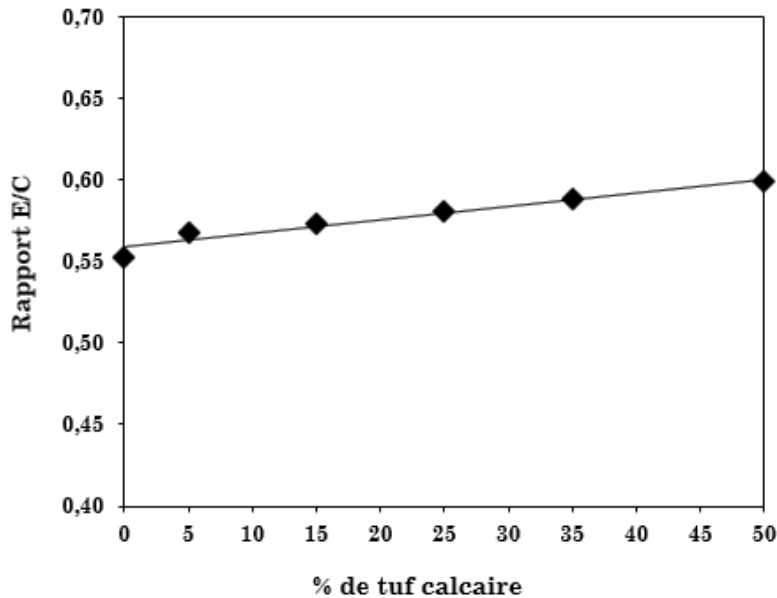
*a. Effet de la substitution de tuf vis-à-vis l'ouvrabilité*

- Cherrak et al. ont montré qu'avec l'ajout du superplastifiant, l'affaissement pour les différentes formulations est similaire à celle du béton témoin (béton ordinaire). Par contre, sans ajout du superplastifiant, une perte de l'affaissement avec l'augmentation du pourcentage de tuf est observée, cette perte est significative pour le tuf de Htattba qui présente un fort pourcentage en fine (figure 4). Ils ont constatés que l'augmentation de pourcentage de tuf joue un rôle négatif dans la rhéologie du béton. Ces résultats de perte d'ouvrabilité sont observés avec d'autre additives comme les fines calcaires, la poudre de marbre et les agrégats de béton de démolition recyclés [20, 21, 22 et 23]

- Zaidi et souiah ont observé que le rapport E/C qui produit un affaissement de 8 à 12 cm, varie en fonction du pourcentage du tuf calcaire (figure 5). Cette variation est sous forme linéaire, qui est due à la nature absorbante des particules de tufs calcaires.



**Figure I. 7** Variation de l'affaissement par rapport au % de tuf [19]



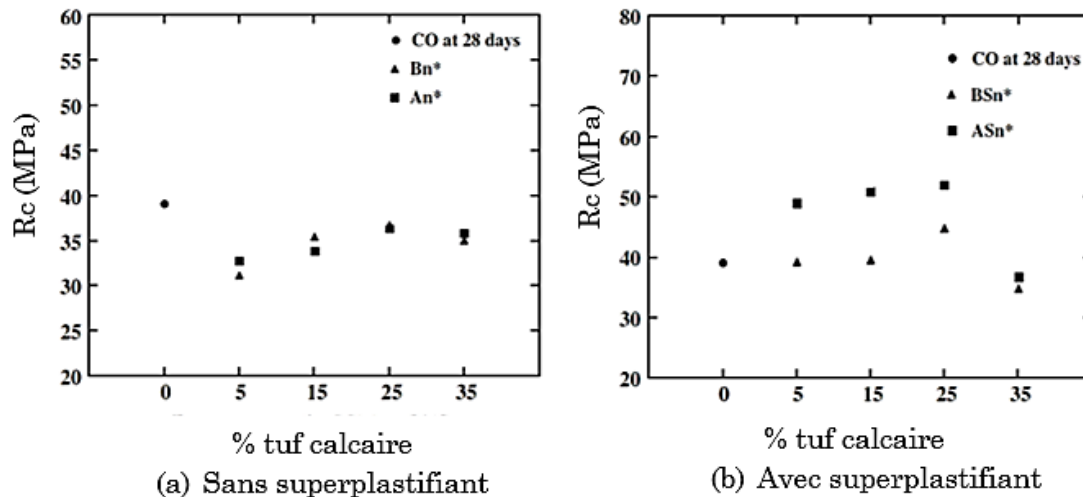
**Figure I. 8** Variation du rapport E/C en fonction du % de tuf calcaire [18]

*b. Effet de la substitution de tuf sur le comportement mécanique*

- La figure 6 présente les résistances en compression simple des différentes formulations pour les deux tufs Sans et avec ajout de superplastifiant (Cherrak et al., 2013). Ils ont constaté que les bétons non adjuvantés (sans superplastifiant) présentent des faibles résistances à la compression simple par rapport à celle du béton ordinaire témoin (figure 6-a). Par contre pour les bétons adjuvantés (avec superplastifiant), ils ont

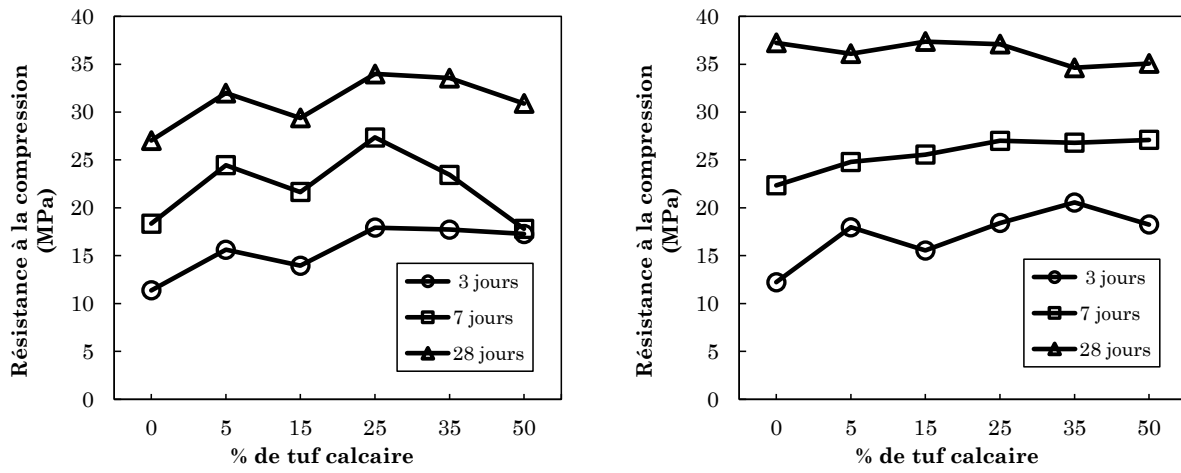
constaté une augmentation appréciable des résistances mécaniques par rapport celle du béton ordinaire témoin (figure 6-b).

Au-delà de 28 jours les auteurs, ont constaté, pour les deux cas sans et avec ajout de superplastifiants, l'apparition d'un pourcentage optimal de tuf (25% pour les deux tufs) pour laquelle les résistances sont maximales.



**Figure I. 9** Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du pourcentage de tuf calcaire (a) sans ajout de superplastifiant (b) avec ajout de superplastifiant [19]

- Zaidi et Souiah [18], ont étudiée la variation de la résistance en compression simple en deux modes de conservation. Elles ont constatée l'apparition d'un pourcentage de substitution optimal de 25% de tuf dans la matrice de béton pour lequel les résistances mécaniques (compression et flexion simple) sont maximales (figure 10a, 10b). Ce pourcentage optimal est le même pour les différentes durée de conservation.



**Figure I. 10** Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du pourcentage de tuf calcaire (a) à l'air libre (b) sous l'eau [18]



# Chapitre 2

## Caractérisation des matériaux et Protocol expérimental

---

<b>1. Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>2. Matériaux de base .....</b>	<b>40</b>
2.1. Localisation des matériaux .....	40
<b>3. Caractérisation des matériaux.....</b>	<b>41</b>
3.1. Caractéristiques physiques .....	41
<b>4. Formulation de béton autoplaçant « BAP ».....</b>	<b>47</b>
3.1. Formulation du mortier auto plaçant « MAP ».....	48
3.2 Formulation du BAP.....	49
<b>5. Protocol expérimental.....</b>	<b>50</b>
4.1 Essais sur MAP à l'état frais.....	50
4.2. Essais sur BAP à l'état frais.....	52
4.3. Essai BAP à l'état durci.....	56
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>59</b>

---

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, la première phase présente les caractérisations des matériaux locaux utilisés (Tuf, sable et graviers). La deuxième phase présente les essais expérimentaux basés sur l'optimisation de pourcentages de fines tuf calcaires avec un S/M variant, puis la substitution de sable de tuf calcaires par le sable alluvionnaire après la fixation du rapport S/M et le pourcentage de fine, qu'on pourra les utilisées par la suite dans la composition du béton autoplaçant et étudier son comportement physico-mécanique.

## 2. Matériaux de base

### 2.1. Localisation des matériaux

Les matériaux intervenant dans cette étude sont issus de la région de Laghouat. Le premier est le tuf le second c'est le sable de carrière d'Oued M'zi.

**Tuf** : le tuf est un matériau pulvérulent poudreux de couleur blanche. Extrait d'un gisement à âge de formation qui va du quaternaire au Crétacé. Ce gisement est utilisé souvent dans les projets routiers. Il est extrait près de l'axe de la route transsaharienne <<Route de l'Unité Africaine>> qui traverse le centre-ville de la wilaya de Laghouat.

**Sable** : le sable alluvionnaire issu de carrière d'Oued M'zi située au Nord-Est de la commune de Laghouat. En effet ; ce sable est généralement utilisé dans la composition des bétons dans tous les projets de construction de la région.

**Gravier** : les graviers utilisés sont de classe granulaire 3/8 et 8/15 issus de concassage des roches calcaires de la région de Laghouat.

**Ciment** : pour la confection des bétons un seul type de ciment est utilisé, c'est ciment portland CPA- CEM I 42.5, fabriqué par la cimenterie de Biskra.

### 3. Caractérisation des matériaux

La majorité des essais de caractérisation des matériaux de base ont été réalisés selon la norme française dans le laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat.

#### 3.1. Caractéristiques physiques

##### 3.1.1. Analyse granulométrique

Pour le sable alluvionnaire, le tuf et les graviers 3/8 ; 8/15, l'analyse granulométrique est effectuée par tamisage à sec selon la norme NF P 18-560.

La figure II.1, présente la courbe granulométrique du tuf calcaire à l'état brut.

D'après cette analyse, on a constaté que :

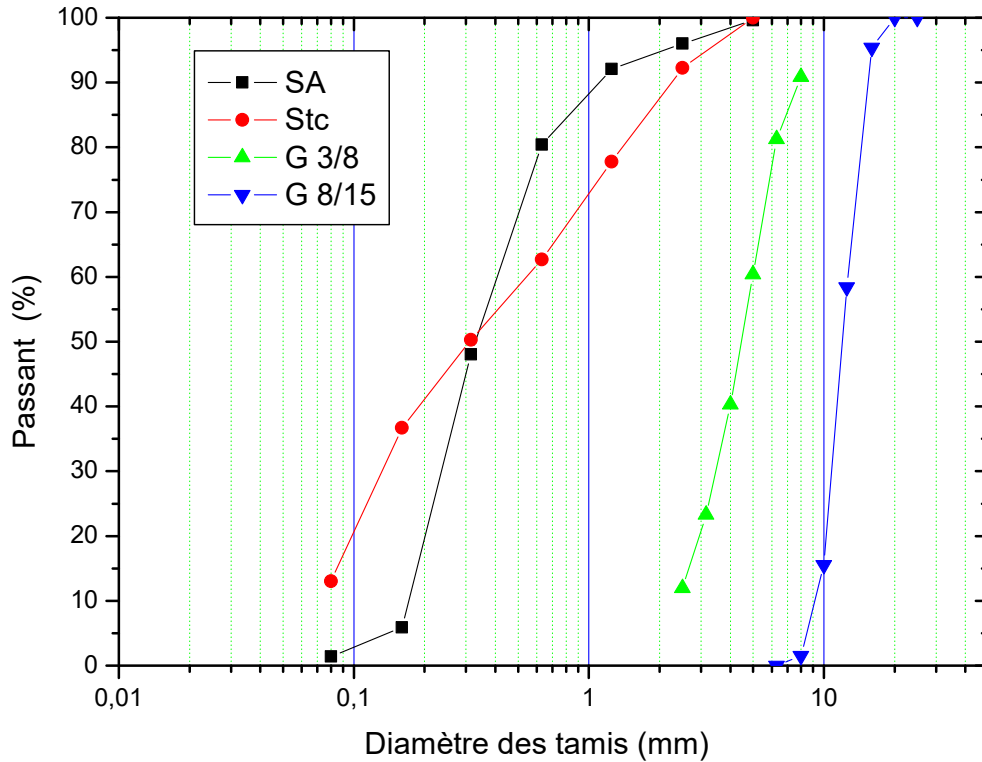
- Le tuf possède une courbe granulométrique étalée. Le diamètre maximum des granulats ( $D_{max}$ ) est de 31.5 mm avec une fraction sableuse ( $< 2$  mm) de l'ordre de 70%. Le pourcentage de particules fines (passant à 80  $\mu$ m) est de l'ordre de 19 à 20 %.



**Photo II. 1** Analyse granulométrique de sable et graviers

La figure II.1, présentent les courbes granulométriques des matériaux étudiés.

D'après cette analyse, nous ne constatons que les matériaux possèdent des courbes granulométriques serrée.



**Figure II. 1** Courbe granulométrique des matériaux utilisée (tuf, sable, graviers)

### 3.1.2. Module de finesse (Mf)

Le module de finesse des sable est défini comme étant le centième de la somme des refus (exprime en % de poids) aux tamis : (0,63 ; 1 ; 1,25 ; 1,6 ; 3,15 ; 5).

### 3.1.3. Masse volumique

Les masses volumiques des matériaux utilisés sont mesurées selon normes françaises.

#### a) Masse volumique absolue NF P 18-555

C'est la masse par unité de volume absolue du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

Pour le sable et le tuf on a utilisé généralement le pycnomètre pour mesuré les masse volumiques absolue, concernant le gravier on a utilisée l'éprouvette graduée. Concernant le ciment, ont utilisé le benzène avec le pycnomètre de Chatelier (photo II.9).

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Avec :  $M_s$  : masse sec des grains solides ;  $V_s$  : le volume des grains solides.

### 3.1.4. Coefficient de l'absorption des granulats NF P 18-555

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte est appelé absorption.

L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30% du poids sec pur granulat léger.

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Chaque résultat de matériaux représente la moyenne de trois essais.

$$Abs = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Avec :  $M_s$  : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve 109° (24 heures).

$M_h$  : masse de l'échantillon imbibé.



**Photo II. 2** Mesure d'absorption

### 3.1.5. Equivalent de sable

L'essai est réalisé selon la norme NF P18-598. Il permet de mettre en évidence la proportion relative de poussières fines ou élément argileux présents dans le matériau désiré.

Deux indices sont déterminés : Es (vue) et Es (piston). Chaque résultat représente la moyenne de trois essais.



**Photo II. 2** Essai Equivalent de sable

D'après des résultats nous constatons que le tuf calcaire et le sable alluvionnaire sont des matériaux propres.

**Tableau II. 1** Les résultats de caractérisation des matériaux utilisés

Essais de caractérisations		SA	Stc	G. 3/8	G.8/15
Analyse granulométrique	Coefficient d'uniformité Cu%	2,4	6,87	-	-
	Coefficient de courbure Cc%	0,84	0,38	-	-
Module de finesse		2,76	2,67	/	/
Masse volumique absolue		2.6	2,4	2,61	2,67
Coefficient d'absorption		0,58	6,6	2,24	2,19
Equivalent de Sable	Es (visuel)	85	70	/	/
	Es (piston)	94	17	/	/

### 3.1.6. Essai Bleu de méthylène

Selon la norme NF P94-068, L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et on contrôlant l'absorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache.

L'absorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.



**Photo II. 3** L'essai bleu de méthylène

**Tableau II. 2** les résultats de l'essai VB

Matériaux	Vb (%)	Surface spécifiques (cm <sup>2</sup> /gr)
Tuf (inférieur à 5 mm)	0.7	14.7
Tuf (inférieur à 0.080mm)	1.035	21.735

D'après les résultats nous constatons que les fines de tuf calcaires sont des sablo-limoneux des sols sablo-argileux, et pour les sables de tuf calcaires sont sensible à l'eau.

### 3.1.7. L'indice d'activité

Selon la norme NF P18-508, L'indice d'activité d'une addition calcaire est le rapport entre la résistance à la compression d'éprouvettes de mortier, préparées avec 75 % en masse du ciment et 25 % en masse d'additions calcaires (Fc), à celle d'éprouvettes de mortier (témoin) préparées avec le même lot de ciment d'essai. Les éprouvettes sont confectionnées avec un rapport E/C ou E/(C + Fc) de 0,50.

La préparation des éprouvettes et la mesure de leur résistance à la compression sont effectuées conformément à la norme NF EN 196-1.

Les exigences requises pour l'indice d'activité à 28 jours sont :

La valeur spécifiée inférieure fixée à ..... 0,71 ;

La valeur limite absolue inférieure fixée à ..... 0,68.



**Photo II. 4** Essai l'indice d'activité

**Tableau II. 3** résultats à la compression de l'indice d'activité

Mélange	Rc ( MPa)	Ic
100% Ciment + 0% Ftc	21.56	0.7
75% Ciment + 25% Ftc	15.08	

D'après les résultats nous constatons que les fines de tuf calcaires (Ftc) sont actives.

#### 4. Formulation de béton autoplaçant « BAP »

La méthode de formulation adoptée dans notre travail est celle proposée par le japonais OKAMURA, appelée la méthode générale. Elle est simple, et peut produire un BAP de propriétés adéquates à la majorité des applications. Par ailleurs, cette méthode présente l'avantage d'être applicable même en utilisant des matériaux locaux, mais à conditions de faire quelques modifications notamment au niveau de la teneur en sable.

Le BAP est fortement liée à celle du MAP et en suivant les étapes de la méthode générale, la formulation du MAP constitue une étape primordiale en vue de confectionner un BAP.

### 3.1. Formulation du mortier auto plaçant « MAP »

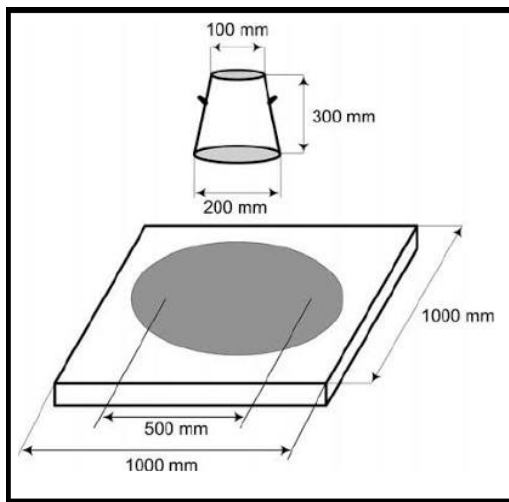
Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés requises pour que le mortier puisse être considéré comme auto plaçant sont : une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statiques et dynamiques.

Du moment que le mortier occupe un volume important dans les BAP (presque 70% du volume du BAP), les résultats d'essais sur le MAP seront concluants et peuvent donner une grande idée sur le comportement rhéologique du BAP.

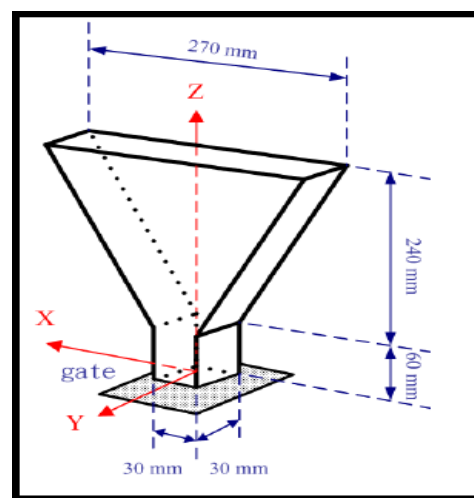
Selon Domone et Jin [24] les mortiers sont testés pour les raisons suivantes

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

Les mortiers sont testés à travers l'essai d'étalement au mini-cône et l'essai d'écoulement au mini-entonnoir en V schématisés dans les figures (2 ; 3).



**Figure II. 2** l'essai de l'étalement au mini- cône



**Figure II. 3** l'essai de l'écoulement au V-funnel

Ces tests ont pour but de déterminer la teneur en eau (rapport Eau/Liant), la teneur en sable (rapport Sable/Mortier) et le dosage en super plastifiant (rapport super plastifiant/Liant).

### **3.1.1. Rapport Eau/Liant (E/L)**

Des études ont montré que le rapport E/L optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0.84 et 1.07 en volume qui correspond à l'intervalle 0.28 et 0.45 en masse. Les rapports E/L au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer un blocage ou une ségrégation du mélange.

Des essais préliminaires réalisés par M ELHADJ AISSA [thèse doctorat] ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport en masse de 0.4 afin d'avoir un MAP satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270mm.

Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0.4.

### **3.1.2. Rapport Sable/Mortier (S/M)**

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du BAP à l'état frais et à l'état durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0.5, 0.45 et 0.4 tout en faisant varier le rapport super plastifiant/liant (Sp/L).

### **3.1.3. Dosage de Superplastifiant (Sp)**

D'après littérature on a choisi le dosage du superplastifiant égale à 1%, c'est le dosage de saturation.[25],[26]

## **3.2 Formulation du BAP**

Une fois que la composition du MAP de référence sera obtenue, on ajoute des gravillons pour composer le BAP de référence conformément à la méthode générale de formulation.

Le BAP de référence sera ensuite testé moyennant à l'essai d'étalement au cône d'Abrams pour valider les rapports déterminés précédemment notamment le

rapport SP/L. Pour accepter ces rapports, le mélange obtenu doit avoir un étalement variant entre 65 et 80 cm, et ne doit pas présenter aucun signe visuel de ségrégation ou de ressuage.

### **3.2.1. Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M)**

Afin de minimiser le nombre de variables pour le béton autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/L trouvés lors des essais effectués sur le mortier, et chercher la meilleure formulation du BAP de référence en ajustant le rapport Sp/L.

### **3.2.2. Fixation des rapports Sable/Mortier (S/M) et Eau/Liant (E/L)**

Comme point de départ, on prend le résultat des essais sur mortier, du rapport Sp/L. Il suffit de quelques mesures d'étalement (au cône d'Abrams) et de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport SP/L donnant un bon béton autoplaçant sans ségrégation ni ressuage. Une fois que le BAP de référence est obtenu, pour les autres BAP, on commence par substituer une partie du ciment par les fines de tuf calcaires.

## **5. Protocol expérimental**

### **4.1 Essais sur MAP à l'état frais**

Les propriétés du MAP à l'état frais sont caractérisées par la mesure de l'étalement à l'aide de du mini-cône et la mesure du temps d'écoulement par le V-funnel.

#### **4.1.1. Essai d'étalement au Mini-cône**

L'essai consiste à remplir le petit cône de mortier, placé sur une plaque à surface propre et humidifiée. Le cône est ensuite soulevé et le mortier en sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette du mortier ainsi obtenue. La tendance à la ségrégation et au ressuage peut être détectée visuellement, le sable doit être réparti uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.



**Photo II. 5** l'essai d'étalement au mini cone

#### 4.1.2. Essai de l'entonnoir en V (V-funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : rempli de mortier de 1.1 L de mortier, puis on mesure le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bac de l'entonnoir.



**Photo II. 6** L'essai d'écoulement au V-Funnel

Okamura et al, ont proposé d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 270 et 330 mm caractérise un MAP. Quand Chai, qui à travailler avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec.

## 4.2. Essais sur BAP à l'état frais

### 4.2.1. Essai d'étalement (Flow test)

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son poids propre. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton auto plaçant [12].

Pour la détermination de l'étalement on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement du béton ordinaire. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (> 900 par 900mm), puis le cône est rempli de BAP ensuite il est soulevé de sorte que le BAP en sortant forme une galette qui s'élargit sous son poids propre.

Après l'étalement, on mesure les deux diamètres perpendiculaires de la galette soit  $d_1$  et  $d_2$  figure (...), puis on déduit la valeur de l'étalement qui correspond au diamètre moyen de la galette. La tendance à la ségrégation peut être évaluée visuellement. Les granulats grossiers devraient être repartis uniformément et aucune concentration ou séparation des fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.



**Photo II. 7** l'essai de l'étalement au cône d'Abrams

#### 4.2.2. Essai temps d'écoulement en V (V-funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V mis en place par Okamura et Ozawa permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (en secondes)



**Photo II. 8** l'essai de l'écoulement en V\_Funnel

On remplit l'entonnoir de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment de libération de la trappe et le moment où on aperçoit la lumière à travers le haut de l'entonnoir.

Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il ya de la ségrégation on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir ou si le mélange est trop visqueuse, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important.

Selon EFNARC. Le temps d'écoulement du béton auto plaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Un temps compris entre 5 et 12 secondes est recommandé pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

### 4.2.3. Essai de la courone J ( J-Ring test)

L'essai à la courone J ou l'étalement modifié (J-Ring). Il fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage (figure ...).

A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètres sont soudées des barres d'armature 16 à 18mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats parait homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau, le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures.



**Photo II. 9** l'essai de la courone J-Ring

### 4.2.4. Essais de la boîte en L (L-Box test)

L'essai au L-Box permet d'évaluer la capacité de passage et de remplissage du BAP à travers un grillage d'armature. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (3 barres de diamètres 14, espacés de 39 mm) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (2 barres d'espace de 58 mm) [27].



**Photo II. 10** l'essai de la boîte en L ( L-Box)

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H_2/H_1$ , doit être supérieur à 0.8 . des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurée pour apprécier la viscosité du béton.

#### **4.2.5. Essai de stabilité au tamis (Résistance à la ségrégation)**

L'essai de ségrégation au tamis vise à qualifier la résistance du BAP à la ségrégation dynamique en mesurant l'indice de ségrégation qui est le rapport de la quantité de laitance sur la masse de l'échantillon. Des valeurs de l'indice de ségrégation varient entre 5% et 15% est le signe d'une résistance satisfaisante à la ségrégation, inférieur à 5% la résistance est considérée excessive, ce qui effectue la qualité des parements (mauvaise qualité des parements), entre 15% et 30%, la résistance est considérée critique, au-delà de 30%, la résistance est mauvaise [11].



**Photo II. 11** l'essai de stabilité au tamis

### 4.3. Essai BAP à l'état durci

Les essais présentés ci-dessous caractérisent les propriétés mécaniques et la durabilité du béton auto plaçant. Pour les essais mécaniques, nous avons évalué la résistance à la compression et la résistance à la traction au fonction de l'âge de maturation. En ce qui court terme concerne l'étude de la durabilité à court terme, nous avons réalisé les essais suivants :

- ❖ L'absorption d'eau par capillarité.
- ❖ L'absorption d'eau par immersion totale.

#### 4.3.1. Résistance à la traction par flexion trois points

L'essai de résistance à la traction est effectué en conformité avec la norme NF P18-433. La méthode consiste à soumettre des éprouvettes prismatiques reposant sur deux appuis à une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture (figure ...). La charge est appliquée à l'aide d'une presse à lecture digitale reliée à un système d'acquisition (PC) par lequel on introduit la vitesse de chargement (50N/s). La force à la rupture est donnée par le même système. La résistance à la traction est obtenue en faisant un simple calcul de résistance des matériaux. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de (7-7-28) cm à 3, 7, 28, 56 jours.



**Photo II. 12** Résistance à la traction par flexion trois point

### 4.3.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression peut être mesurée sur les éprouvettes cylindriques ou prismatiques conformément à la norme NF P18-430. L'essai de compression de fait, dans notre cas, sur six morceaux de trois éprouvette prismatiques qui ont été préalablement écrasées par flexion. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la fin rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 2000KN, cette presse est muni d'un affichage digital permettant d'entrer la surface de l'éprouvette, la vitesse de chargement (2.5 KN/s) et d'obtenir la force et la résistance à la compression.

### 4.3.2. Absorption capillaire

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons moulées ou carottés, non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de la sportivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées, selon les recommandations de la procédure AFRE, qui a également fait l'objet de recommandations dans la synthèse des travaux du projet [28].

L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de (7x7x28 cm). Le protocole de cet essai consiste à sécher des éprouvettes prismatiques à l'étuve à  $105 \pm 50$  C° pendant 72 heures. Les surfaces latérales des éprouvettes sont ensuite imperméabilisées à l'aide d'une matière plastique étanche, et ce pour assurer la remonté unidirectionnelle d'eau par capillarité. Les éprouvettes sont ensuite pesées sont  $M_0$ . Ensuite, les éprouvettes sont mises verticalement dans un récipient remplie en eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient partiellement immergées (environ 5 mm). Il faut noter que le niveau d'eau doit rester constant tout au long de l'essai. Les éprouvettes sont retirées et pesés ( $M_1$ ) régulièrement selon la norme NF P 10-502. La figure II.4 schématise le protocole de cet essai.

$$Cac = \frac{\Delta M}{A \cdot \sqrt{t}} 100$$

Avec :

Cac : coefficient d'absorption par capillarité

$\Delta M$  : masse d'eau absorbée ( $\Delta M = M_1 - M_0$ )

A : section de la base de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>

T : temps d'absorption en minutes.

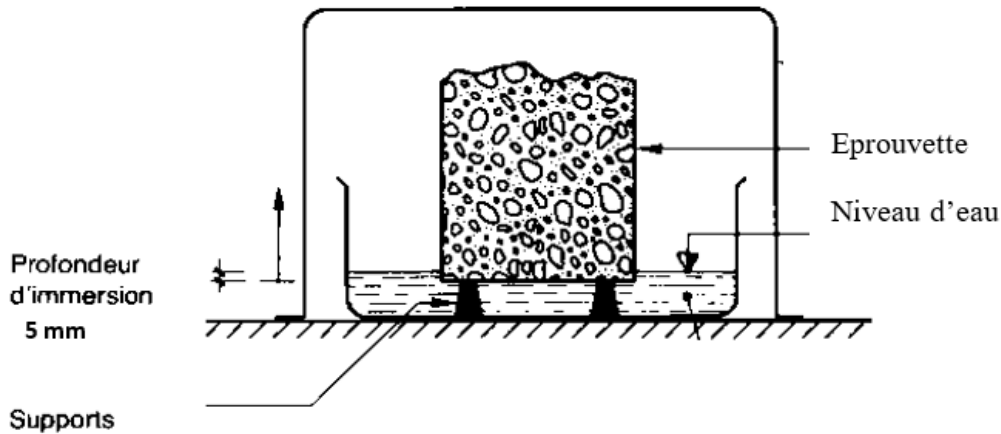


Figure II. 4 Schéma de l'essai d'absorption d'eau par capillarité

#### 4.3.4. Absorption d'eau par immersion totale

Cet essai est réalisé en conformité avec la norme ASTM C642-97 [19]. La méthode consiste à sécher préalablement des éprouvettes prismatiques à l'étuve à  $105 \pm 5$  C° pendant 72 heures. Les éprouvettes sont ensuite retirées et laissées refroidir, puis pesées soit  $M_0$ . Par la suite, les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau à une température ambiante (21°C) pendant 72 heures.

Après cette période, les éprouvettes sont retirées, et après avoir étoffé leurs faces à l'aide d'une serviette, sont pesées de nouveau soit  $M_1$ , le taux d'absorption est calculé comme suit

$$Abs = \frac{M_1 - M_0}{M_0}$$

Avec :

Abs : taux d'absorption en %

$M_0$  : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg ;

$M_1$  : masse de l'éprouvette à l'état saturé en Kg ;

## 5. Conclusion

Ce chapitre est porté l'étude sur la caractérisation des matériaux de base (sable alluvionnaire, tuf calcaire et gravies) utilisé dans notre formulation de BAP Qui est basé sur la méthode de OKAMORA

les essais expérimentaux basés sur l'optimisation de pourcentages de fines tuf calcaires avec un S/M variant, puis la substitution de sable de tuf calcaires par le sable alluvionnaire après la fixation du rapport S/M et le pourcentage de fine, qu'on pourra les utilisées par la suite dans la composition du béton autoplaçant et étudier son comportement physico-mécanique.

La suite du travail, consiste à étudier le comportement des différents BAP formulés à l'état frais (rhéologie) vis-à-vis l'étalement, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation, et à l'état durcis vis-à-vis les résistances à la compression et la traction, et les essais absorption par capillarité et l'absorption par immersion total. Les organigrammes suivants récapitulent tous les étapes de la partie expérimentale de notre travail.

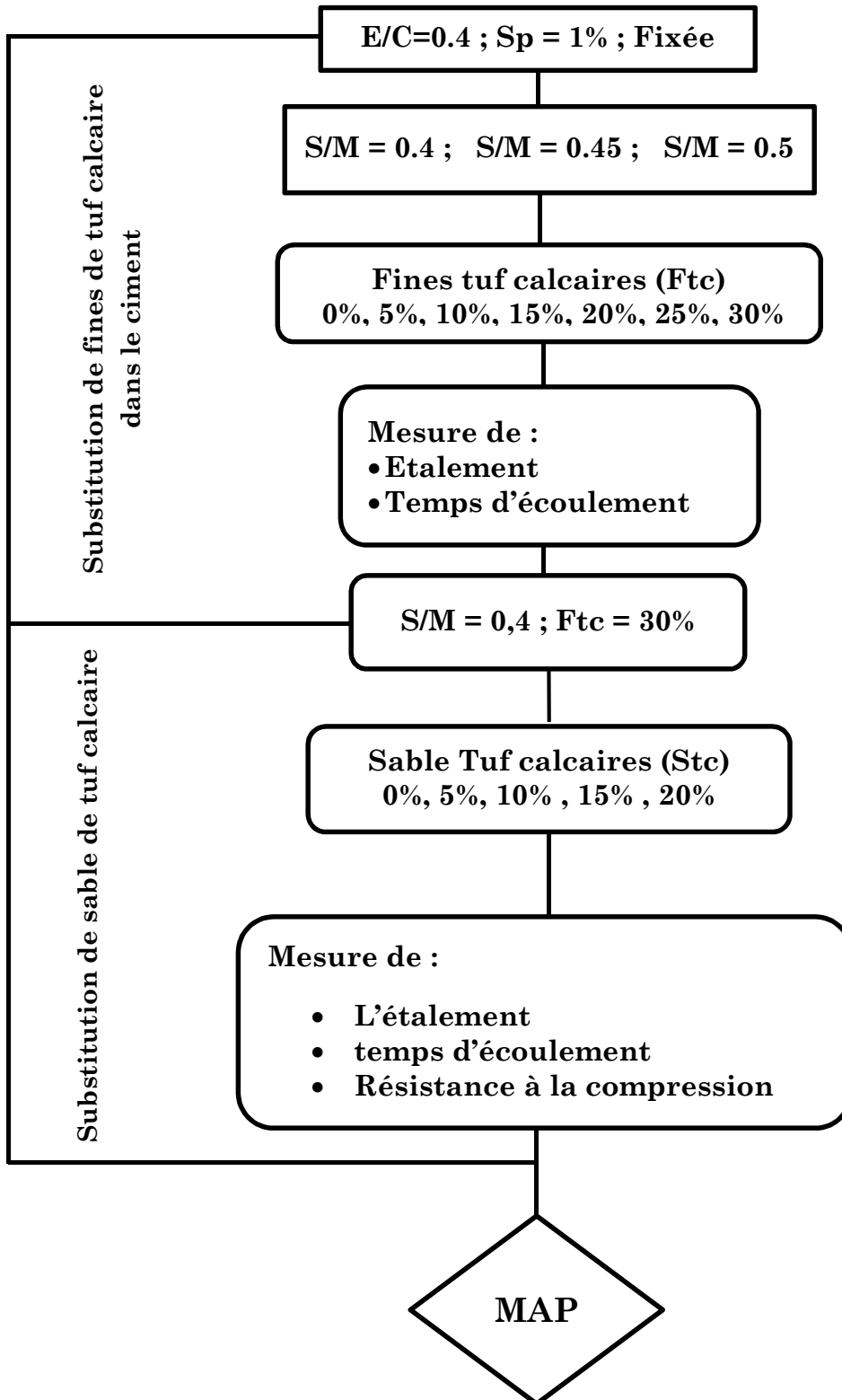


Figure II. 5 L'organigramme des étapes de formulations des MAP

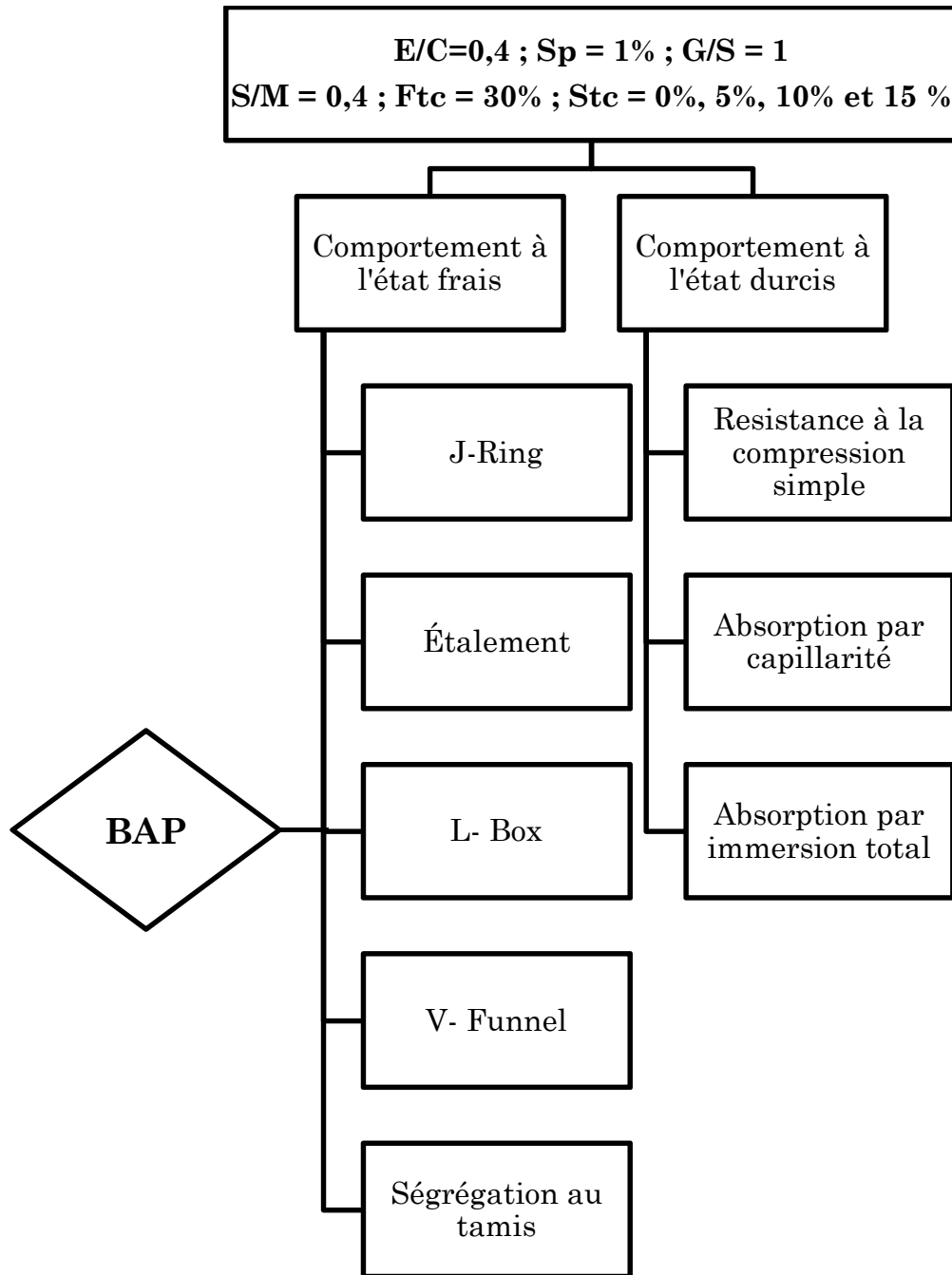


Figure II. 6 L'organigramme des étapes de formulations des BAP

# Chapitre 3

## Analyse des résultats et discussion

---

1. Introduction .....	64
2. Etude rhéologique et comportement mécaniques des MAP .....	64
2.1. Comportement à l'état frais des MAP .....	64
2.2. Comportement à l'état durci des MAP .....	69
3. Rhéologie et comportement physico-mécaniques des BAP .....	71
3.2. Comportement physique et mécanique d'un BAP .....	75
4. Conclusion .....	78

## 1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse des résultats des différents essais de formulation des mortiers et des bétons autoplaçant élaborés. En premier lieu, les résultats de la partie d'optimisation du rapport sable sur mortier S/M est discuté, tout en variant le pourcentage de substitution du ciment par les fines du tuf calcaire, pour la formulation du MAP. Par la suite, les résultats de la partie de la substitution du SA par le sable tuf calcaire, dans la formulation du MAP, pour un rapport de  $S/M = 0,4$  et un dosage de fine de 30% sont exposés et discutés. En fin, on a présenté les résultats concernant les caractéristiques des BAP élaborés à l'état frais et durcis.

## 2. Etude rhéologique et comportement mécanique des MAP

### 2.1. Comportement à l'état frais des MAP

Cette partie concerne d'optimisation du rapport sable sur mortier S/M est discuté, tout en variant le pourcentage de substitution du ciment par les fines du tuf calcaire, pour la formulation du MAP.

On a commencé avec la substitution de ciment par les fines du tuf calcaire dans les trois rapports  $S/M = 0,4, 0,45$  et  $0,5$  choisis. Puis, on a étudié la substitution du SA par le sable tuf calcaire.

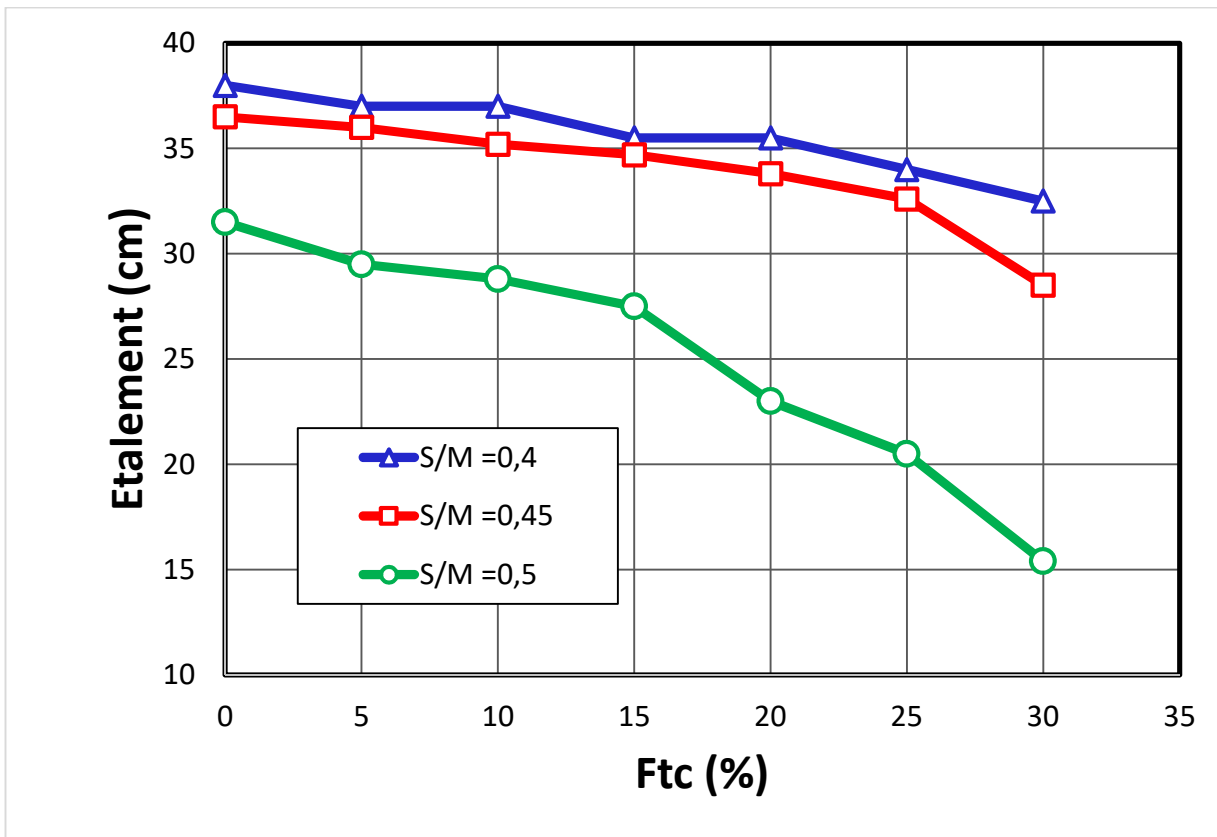
#### 2.1.1. Substitutions du ciment par des Ftc

##### *Optimisation des rapports S/M et Ftc/(C+Ftc)*

Certains travaux réalisés sur les bétons autoplaçant à base de matériaux locaux ont admis, pour obtenir un BAP qui répond aux différents recommandations, un rapport  $S/M=0,5$ ,  $E/C=0,4$  et un  $Sp=1\%$  présent le dosage de saturation. [26 ; 25],

Pour notre cas, trois rapports S/M de  $0,4, 0,45, 0,5$ , ont été choisis, avec une teneur en Ftc varie de 0-30 avec un pas de 5%.

Les résultats des essais de caractérisation (étalement et V-funnel) réalisés sur les différentes compositions des MAP et les intervalles exigés par les recommandations données par Domone et Jin [24], présenté par des lignes horizontales discontinues, sont présentés dans les figures. III. 1 et figure.III.2.



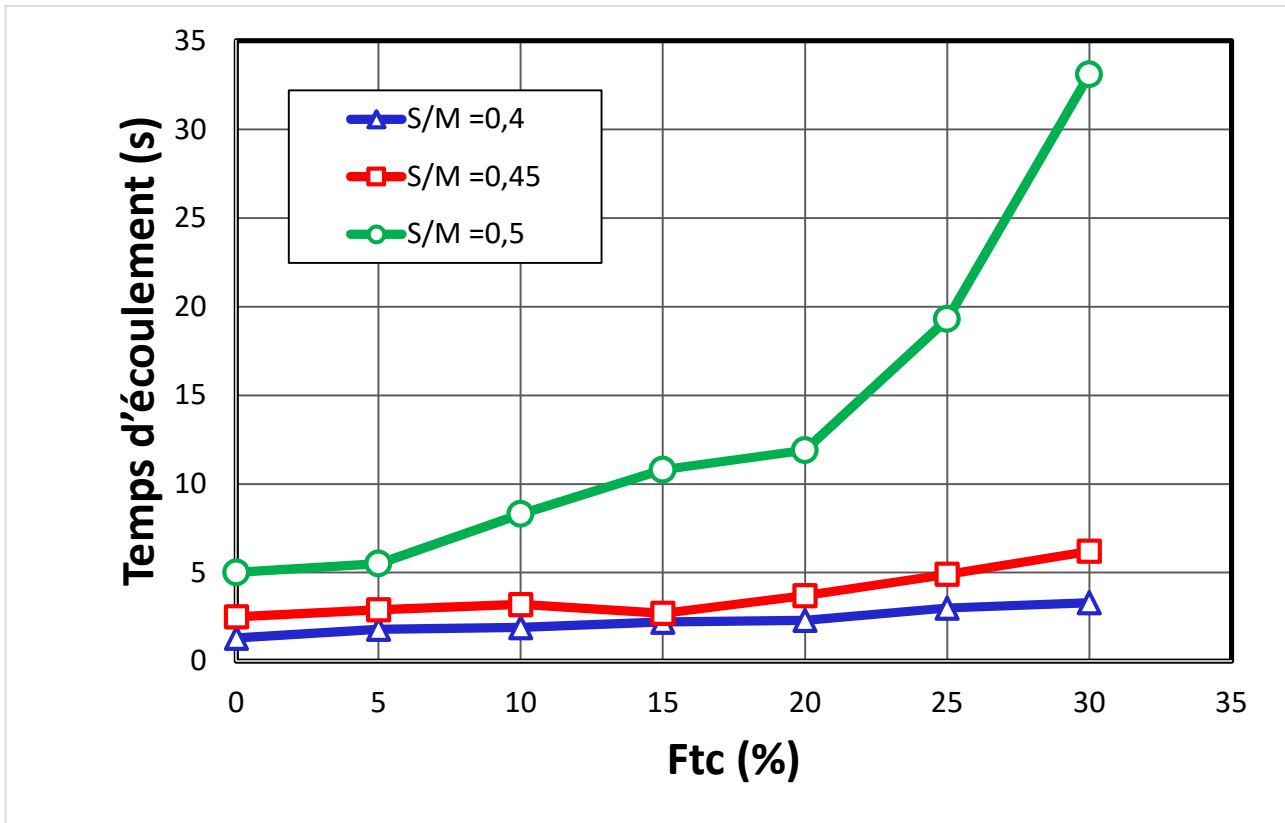
**Figure III. 1** Étalement des mortiers en fonction du dosage en fines tuf calcaire pour différents rapports S/M

D'après la figure III.1, nous remarquons que l'étalement des MAP de différents rapports S/M, diminue en fonction du dosage de substitution de Ftc dans le ciment. Cette diminution est plus remarquée pour les MAP confectionnés avec un rapport S/M=0,5, ou nous constatons qu'au-delà de 15% teneur en Ftc fines que l'étalement est hors du domaine ciblé et par conséquent la fluidité est fortement diminuée de ces MAP.

Pour les MAP confectionnés avec des rapports S/M = 0.4 et 0.45, on a remarqué que l'étalement de ces MAP entre de l'intervalle de 270 à 330

mm recommandé par Domone et Jin [24], pour des taux de substitution 30% et 25% par de Ftc respectivement.

La diminution du rapport S/M conduit à une réduction du volume de sable, et par conséquent à l'augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui contribue significativement à l'amélioration de la fluidité.



**Figure III. 2** Temps d'écoulement des mortiers en fonction du dosage en Ftc pour différents rapports S/M

On constat d'après la Figure. III. 1 que les mortiers confectionnés avec un rapport (S/M) égal 0.5, sont des mortiers fluides jusqu'à une teneur de 15% des Ftc. Au-delà de cette teneur, nous remarquons que temps d'écoulement, des MAP confectionnés avec des rapports S/M = 0,5, augmente et ne satisfait pas les recommandations de Domone et Jin [24], Cette augmentation qui présente une perte de temps d'écoulement, est peut-être due à l'absorption d'eau par les Ftc et à la consommation de Sp. Pour les MAP confectionnés avec des rapports S/M égal à 0.4 et 0.45, on a enregistré des valeurs du temps d'écoulement dans le domaine

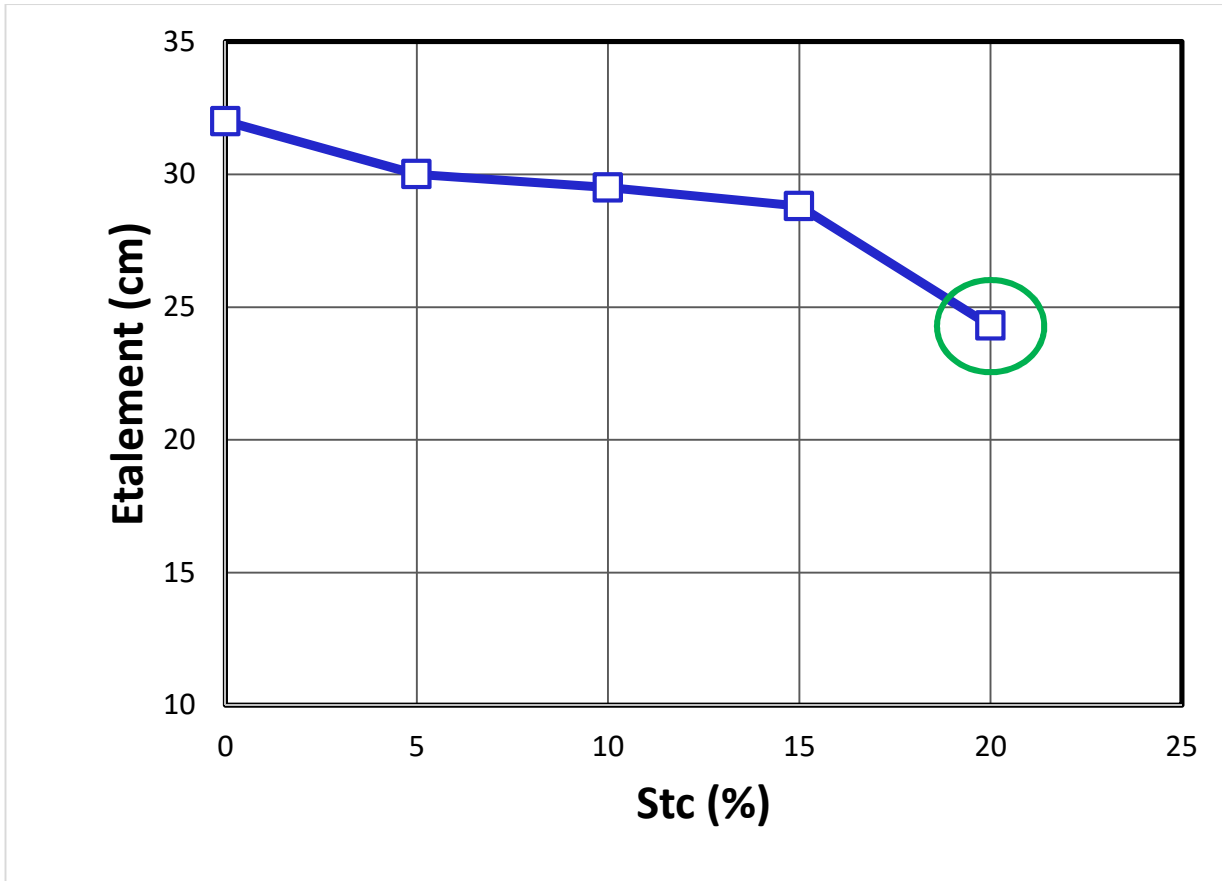
recommandé de 2 à 10 secondes [24]. Par contre, le MAP confectionné avec un rapport S/M=0.4 sans substitution de Ftc donne un mortier très fluide et instable.

### **2.1.1. Substitutions du sable alluvionnaire (SA) par le sable de tuf calcaire (Stc)**

L'objectif de cette phase est d'évaluer l'influence de remplacement du SA par le sable de tuf calcaire, avec des pourcentage varie de 0 à 20% avec le pas de 5%, sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des MAP élaborés. Du fait de la concordance de nos résultats, de la première partie, avec ceux trouvés dans la bibliographie [1]; [29]; [30]; [31], le rapport S/M et la teneur en fines ont été fixé à 0,4 et 30% respectivement.

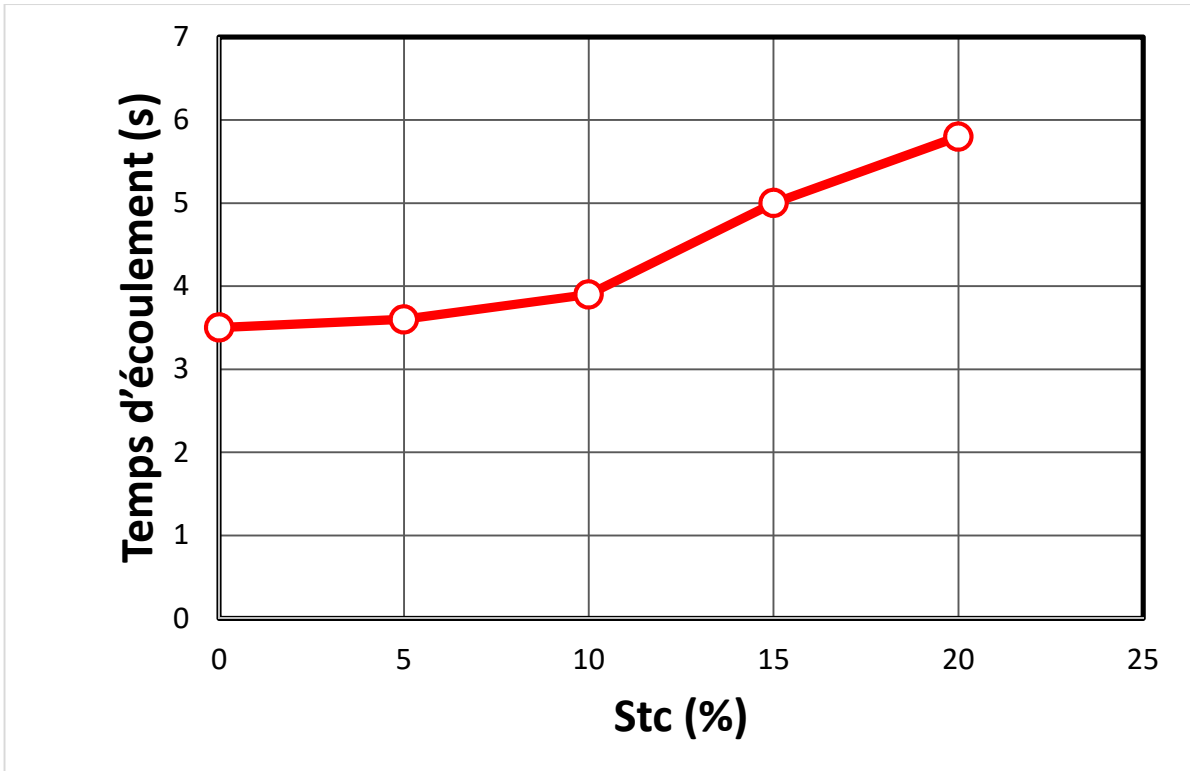
Les résultats des essais, d'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement à l'entonnoir en V, réalisé sur les MAP confectionnés avec différents mélanges SA-Stc sont présentés sur les figures III.3 et III.4.

Pour les résultats de l'étalement des mortiers en fonction de la teneur en sable de tuf calcaire, sont représentés sur la Figure.III.3. On remarque que l'étalement diminue en fonction du pourcentage de Stc et par conséquent la fluidité des mortiers est influencée. Au-delà de 15% de Stc, les mortiers confectionnés ne respectent pas les recommandations de Domone et Jin [25]. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la finesse due à la présence des éléments fins dans le Stc (de l'ordre de 19%), qui absorbe une grande partie de la quantité d'eau.



**Figure III. 3** Etallement des MAP en fonction du pourcentage de Stc

Concernant le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V en fonction du pourcentage de Stc, les résultats sont présentés sur la Figure. III. 4. On remarque que les valeurs d'écoulement sont tous dans l'intervalle, de 2 à 10 secs, proposés par Domone et Jin [24]. Nous constatons, que tous les MAP obtenus sont caractérisés par une meilleure fluidité. Le temps d'écoulement augmente avec l'augmentation de la finesse du sable. Ces résultats coïncident avec ceux trouvés par Tobes et al. [26].



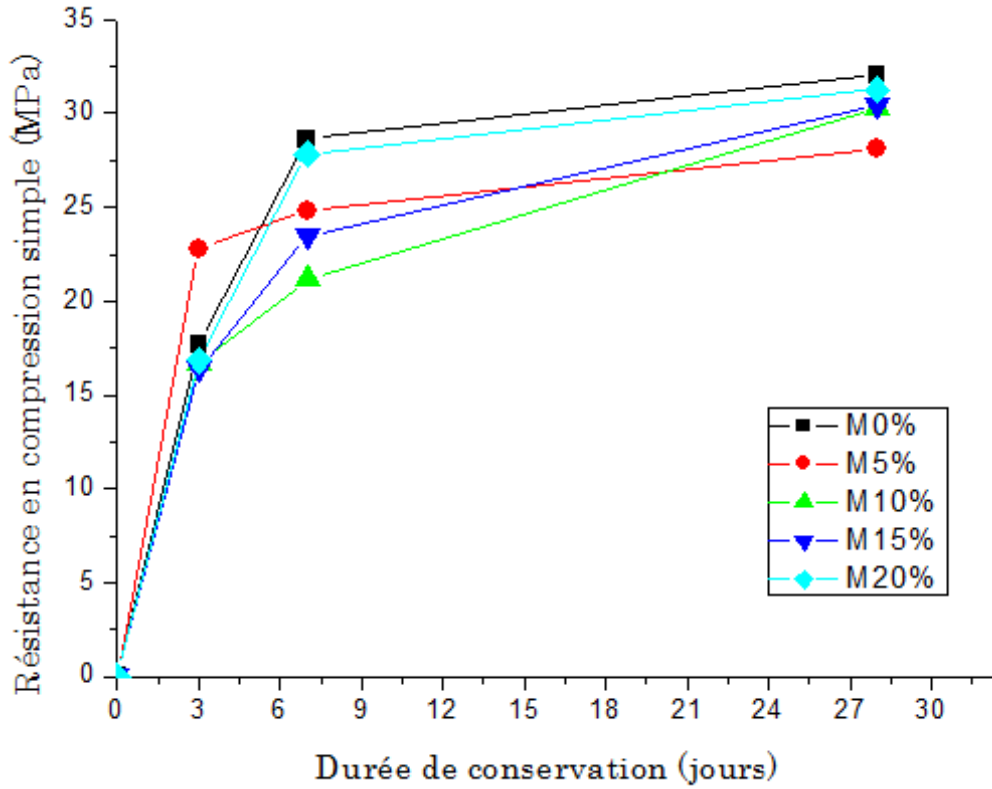
**Figure III. 4** temps d'écoulement des MAP en fonction du pourcentage de Stc

## 2.2. Comportement à l'état durci des MAP

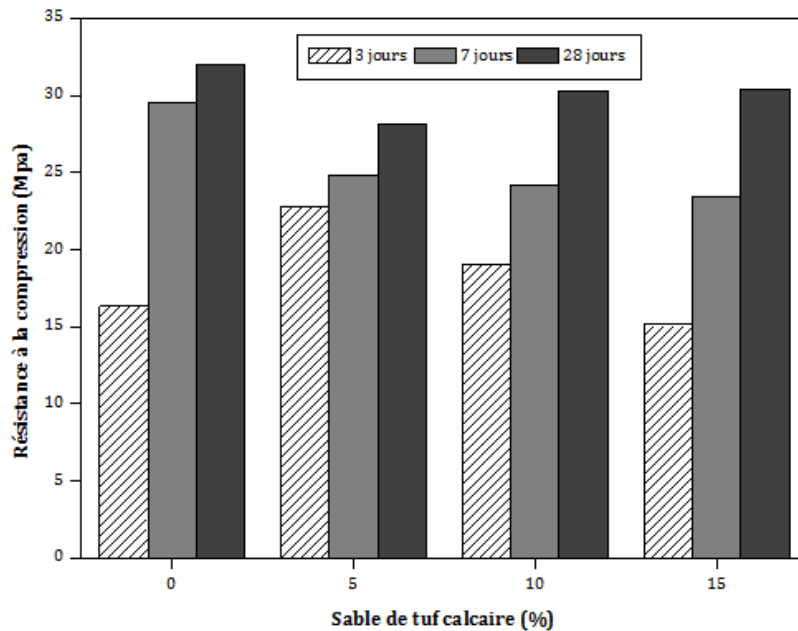
### 2.2.1. Résistance à la compression simple

La figure III représente la variation de la résistance à la compression simple en fonction de STc Conservé sous l'eau jusqu'au différents âge 3,7 et 28. Nous remarquons que la résistance optimal à l'age de 3 jours est de 5% de Stc, à l'age de 7 et 28 jours est 0% de Stc.

Nous remarquons que la résistance à la compression simple pour le pourcentage de 20% donne des résultats presque comme le pourcentage de 0%.



**Figure III. 5** Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge pour les six bétons de conservation sous l'eau



**Figure III. 6** variation de la résistance à la compression aux différents âges

### **3. Rhéologie et comportement physico-mécaniques des BAP**

L'effet de sable de tuf calcaire sur les propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais est analysé à travers une série d'essais particuliers aux bétons autoplaçant. Nous nous sommes tenus à respecter les recommandations de l'AFGC [11] pour la formulation et la caractérisation des bétons autoplaçant formulés. Il s'agit d'étudier l'ouvrabilité (Étalement), la stabilité (stabilité au tamis) et la résistance à la ségrégation (boite en L et J-ring). Un béton autoplaçant devrait présenter à la fois un étalement supérieur ou égal à 60, un rapport à la boite en L supérieur ou égal à 0,8 et une stabilité au tamis inférieur à 15%. Il est important dans cette partie de contrôler visuellement les bétons vis-à-vis la ségrégation et le ressuage. Toutes les compositions sont caractérisées par un rapport S/M = 0,4, teneur en Ftc = 30%, un rapport E/L = 0,4, dosage en SP= 1% et un rapport G/S = 1.

#### **3.1. Comportement à l'état frais**

##### **3.1.1. L'effet de sable de tuf calcaire sur l'étalement**

La variation de l'étalement avec et sans J Ring des bétons en fonction de la teneur en Stc est représentée dans la Figure. III. 5

D'après cette figure nous remarquons que l'étalement diminue par en fonction du pourcentage de substitution de Stc. Cette diminution est due à l'augmentation de la viscosité des BAP élaborés. Cela confirme les résultats trouvés pour les MAP, donc la corrélation entre le béton et le mortier semble être possible. L'étalement des différents BAP élaborés sont compris entre 660 et 880 mm. Selon la classification de l'EFNARC [27], nos BAP élaborés sont classés dans la classe SF2 et SF3, qui peuvent être utilisés dans des structures spéciales.

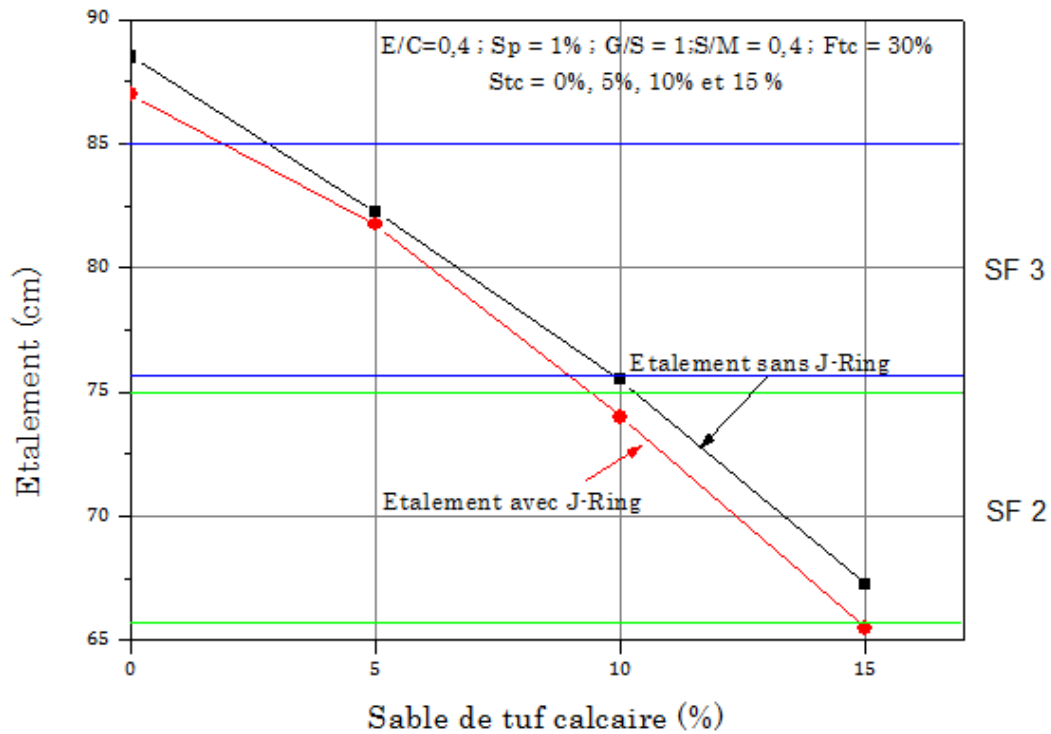
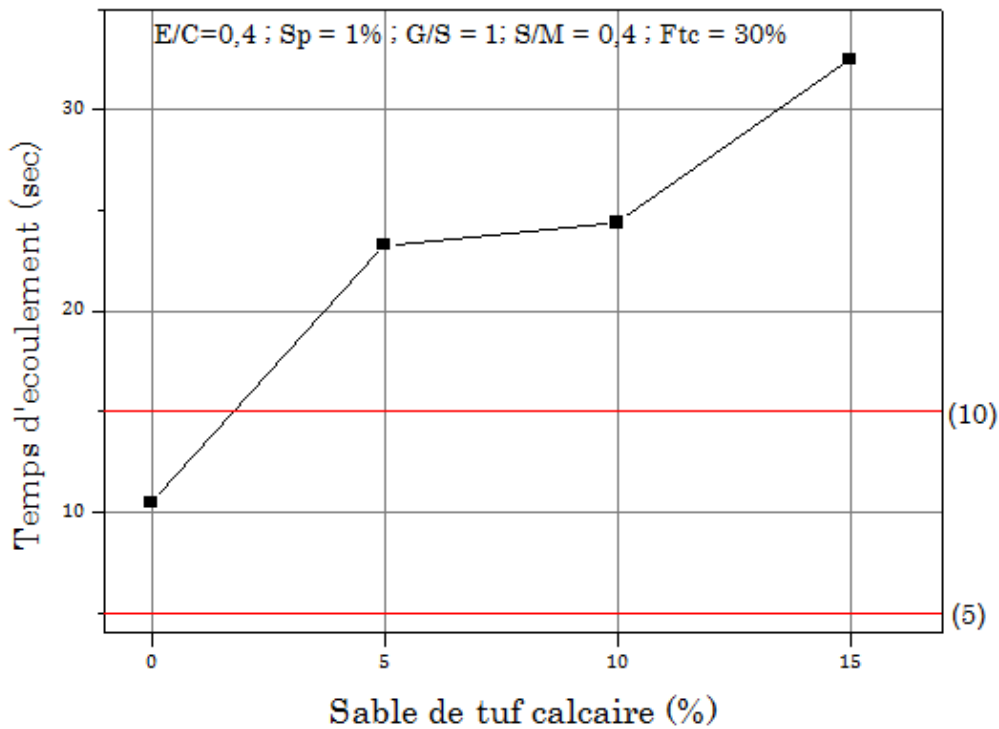


Figure III. 7 Etalement des BAP en fonction de dosage en Stc

### 3.1.2. L'effet de sable de tuf calcaire sur le temps d'écoulement

L'effet de substitution du SA par un Stc sur le temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir ou V-Funnel, est illustré dans la Figure. III. 6. On remarque que les valeurs d'écoulement à travers V- funnel sont tous hors l'intervalle, de 5 à 12 secs, proposés par Domone [24], ce qui traduit par un blocage en V-funnel. Cela est dû à la consommation d'eau par le sable de tuf calcaire est l'effet de finesse (granulométrie de mélange) et l'effet de tassement des particules. À l'exception de BAP contenant de 0% de sable de tuf calcaire. Ce BAP présente une viscosité faible par rapport aux autres BAP.



**Figure III. 8** Temps d'écoulement des BAP en fonction de dosage en Stc

### 3.1.3. Essai de la Boîte en L (L-Box)

La caractéristique de l'essai de la boîte en L (L-Box), donne une bonne appréciation sur les trois capacités, de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. La variation du rapport H2/H1 en fonction du pourcentage de sable de tuf calcaire est montrée sur la Figure. III. 7.

Nous constatons que jusqu'à un rapport de substitution de 10% de Stc le rapport H2/H1 reste constant à une valeur de 100%. Ce qui traduit que la capacité de remplissage des BAP n'a pas été affecté par le taux de substitution de Stc, et par conséquent reste dans la limite proposé par EFNARC. Pour les BAP contenant plus de 10% de Stc, et en raison du taux d'absorption d'eau par les Ftc présent dans le Stc, les mortiers présente une viscosité élevée ce qui traduit par un fort frottement entre les constituants du béton ce qui résulte un blocage au niveau des armatures.

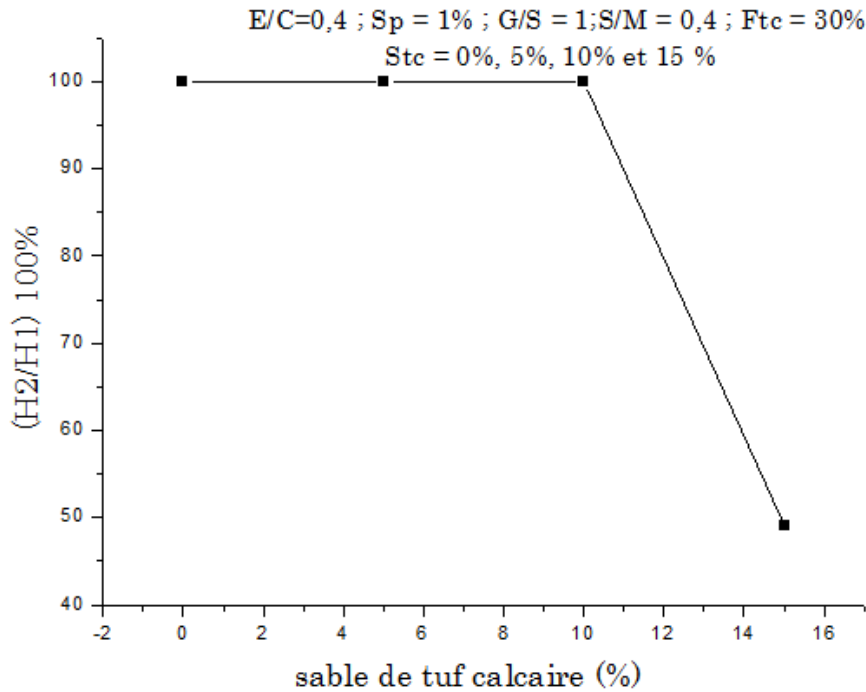


Figure III. 9 les résultats d'essai L-Box

### 3.1.4. Stabilité au tamis

Les résultats de stabilité au tamis sont présentés sur la Figure. III. 8. On constate que les pourcentages de laitance passant à travers le tamis sont compris entre 6 à 15 %, qui satisfont les recommandations de l'ENFRAC [32], sauf pour le BAP avec un taux de substitution égal 0% Stc. Ceci est dû aux taux de Ftc (19%) présent dans le Stc utilisé dans les mélanges.

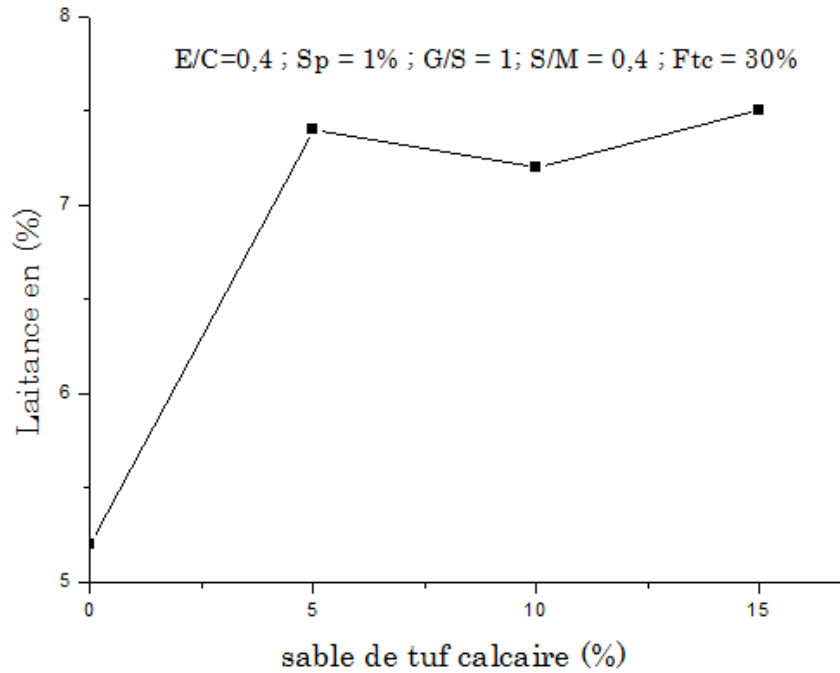


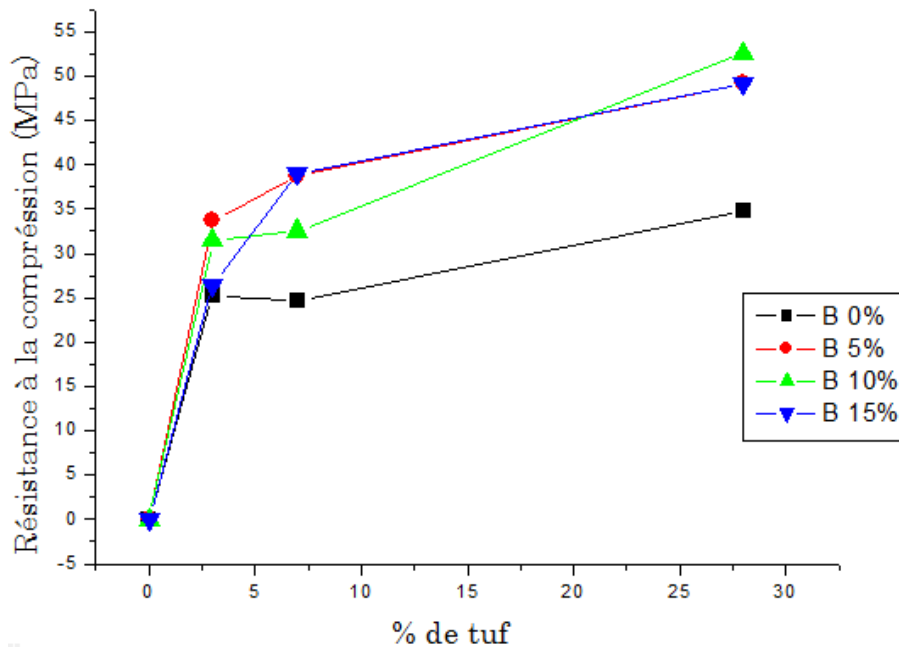
Figure III. 10 les résultats d'essai Ségrégation au tamis

## 3.2. Comportement physique et mécanique d'un BAP

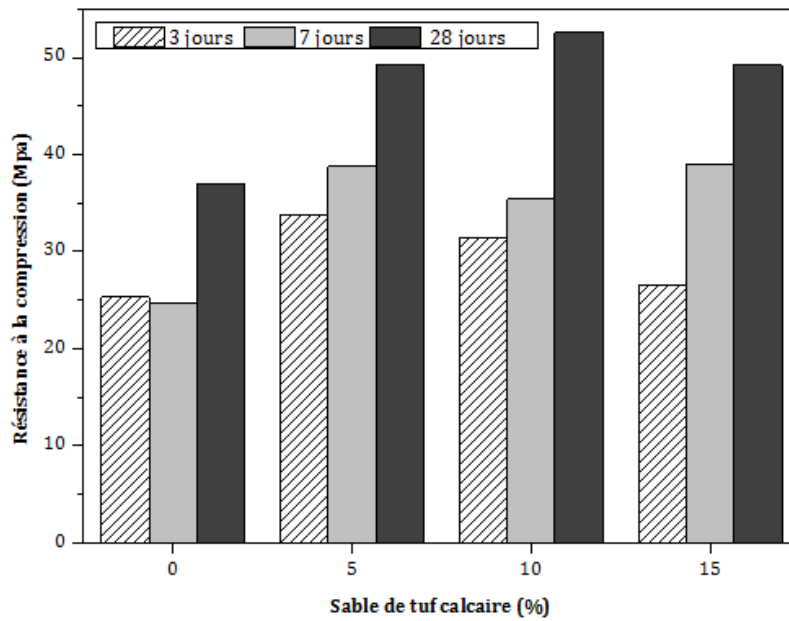
### 3.2.1. Résistance à la compression simple

La figure III.11 représente la variation de la résistance à la compression simple en fonction de STc Conservé sous l'eau jusqu'au différents âge 3,7 et 28. Nous remarquons que la résistance optimal à l'âge de 3 jours est de 5% de Stc, à l'âge de 7 jours donne la même résistance à 5% et à 15% et à l'âge de 28 jours est à 10% de Stc.

Nous remarquons que la résistance à la compression simple pour le pourcentage de 5% de Stc donne des résultats presque comme le pourcentage de 15%.



**Figure III. 11** Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge pour les six bétons de conservation sous l'eau



**Figure III. 12** Variation de la résistance à la compression aux différents âges

### 3.2.2. Absorption par capillarité

Les résultats de l'essai Absorption par capillarité présenté dans la figure III.13, on remarque que l'absorption est augmentée en fonction du temps pour les différents pourcentages de Stc dans les formulations des BAP.

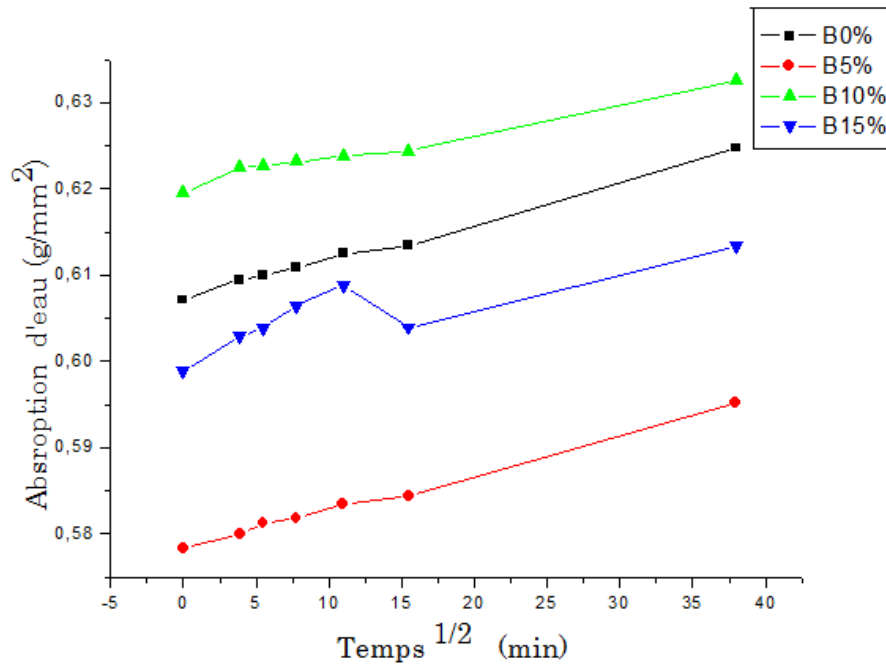


Figure III. 13 résultats d'essai Absorption par capillarité

### 3.2.3. Absorption par immersion total

Les résultats de l'essai Absorption par immersion total présenté dans la figure III.14, on remarque que l'absorption est diminuée pour le pourcentage de 5% Stc, puis elle présente une augmentation pour les pourcentages suivant (10% ; 15%) de Stc.

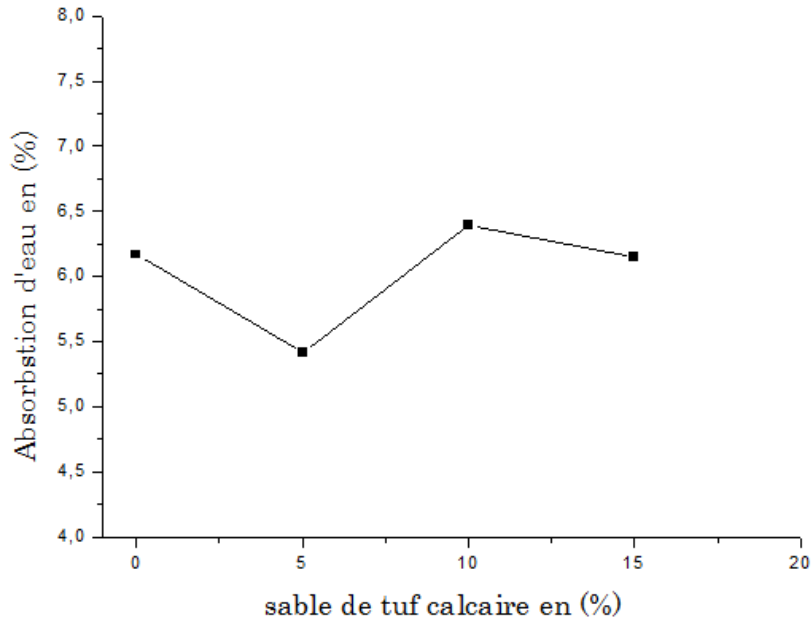


Figure III. 14 résultats d'essai Absorption par immersion total

#### 4. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié a été le comportement mécanique des résultats des différents essais de formulation des mortiers et des bétons autoplaçant élaborés. En premier lieu, les résultats de la partie d'optimisation du rapport sable sur mortier S/M est discuté, tout en variant le pourcentage de substitution du ciment par les fines du tuf calcaire, pour la formulation du MAP. Par la suite, les résultats de la partie de la substitution du SA par le sable tuf calcaire, dans la formulation du MAP, pour un rapport de S/M = 0,4 et un dosage de fine de 30% sont exposés et discutés. En fin, on a présenté les résultats concernant les caractéristiques des BAP élaborés à l'état frais et durcis.



## Conclusion Général

Le matériau tuf calcaire de la région de Laghouat a servi depuis longtemps comme matériau de base dans le domaine de travaux publics. En vue d'étendre d'une son utilisation pour d'autre domaine, une étude du comportement mécanique du matériau s'avère indispensable.

Suite à cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions relatives au comportement physico-mécanique des mortiers et des BAP. Parmi ces résultats on peut citer :

- Possibilité de l'utilisation de la méthode Okamura pour l'élaboration des MAP ou des BAP à base des matériaux locaux.
- La substitution de fine de tuf calcaire (0 – 30%) a apporté un effet bénéfique sur les propriétés du MAP à l'état frais.
- La substitution de sable tuf calcaire (0 – 20%) a apporté un effet bénéfique sur les propriétés du MAP à l'état frais et à l'état durci.
- L'optimisation du BAP a base de pourcentage de fine de tuf calcaire fixé et avec une substitution de sable de tuf calcaire par rapport n sable alluvionnaire (0-15%) a apporté un effet bénéfique sur les propriétés du BAP à l'état frais telle que la déformabilité, la capacité de passage et l'ouvrabilité.
- L'utilisation de tuf calcaire améliore la résistance dans certain pourcentage, on constate que le mortier de référence n'a pas résisté longuement contrairement aux autres mortiers que leurs résistances continuent à augmenter.

Vu les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt du procédé de la substitution d'un matériau de qualité (sable alluvionnaire) par un matériau médiocre (tuf calcaire) dans l'amélioration notable des performances mécaniques d'un BAP. le pourcentage optimal de la fine de tuf calcaire permettant d'améliorer les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais est de 20%.

D'après ces résultats expérimentales qui a présenter le terme d'énergie dans le tuf calcaires et son aptitude d'utilisation dans les BAP et les BO, alors on espérant qu'à travers cette recherche on a apporté un plus dans le domaine de recherche de nouveau matériaux performance et durable et avec le moindre cout, qui pourrait résoudre un problème environnementale, économique et technique dans la construction.

Cette recherche dans le laboratoire a été limitée à l'étude de l'influence de  $T_c$  sur le comportement rhéologique, mécaniques et physique des BAP. D'autres aspects restent élucider et par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

- ✓ Durabilité (attaque sulfatique)
- ✓ Essais thermique
- ✓ Essais porosité

- [1] OKAMURA H.ET AL, “self-compacting high performance concrete” Proceeding of the fifth sec vol.3, pp.2381-2388, 1995.
- [2] Chahine Belghit << contribution a la formulation d’un béton autoplaçant a base de matériaux locaux effet du laitier granulé micronisé sur l’ouvrabilité>> (2009).
- [3] Partiel chapitre 02, Béton autoplaçant, revue bibliographiques
- [4] AFGC, Association française de Génie Civil, *Bétons Autoplaçant ; Recommandations provisoires*, documents scientifiques et techniques, 2002, p. 63
- [5] RILEM, *Self-Compacting Concrete*, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174 – SCC, Edited by A. Skarendahl and O. Petersson, RILEM Publications, France, 2001, p. 168
- [6] Association française de Génie Civil (AFGC), *Bétons Autoplaçant Recommandations provisoires*, juillet 2002 ;
- [7] [AFPC 97] AFPC-AFREM, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse, 1997.
- [8] DE LARRAD F.et AL « prévision de la compacité des mélanges Granulaires le model de suspension solide n°1-fondements théoriques et calibration du model », Bulletin du laboratoire central des ponts et Chaussées n° 194, Nov-Dec 1994.
- [9] BARON J. et OLLIVIER J.P., « Les Bétons – Bases et données pour Leur formulation », éditions Eyrolles, 1996.
- [10] HOLCIM, Imboden, C., Gross, D., Meynell, P. J., Richards, D., & Stalmans, M. (2010). Biodiversity management system: Proposal for the integrated management of biodiversity at Holcim Sites. Geneva: IUCN.
- [11] AFGC, Association française de Génie Civil, *Bétons autoplaçant; recommandations provisoires*, documents scientifiques et techniques, 2002 ;
- [12] Sonebi M, and Bartos P.J.M << Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete>>. *Materials and Structures*, 35:462-469, (2002);

- [13] Dreux, G., & Festa, J. (1995). Nouveau guide du béton: composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en oeuvre, contrôle et normalisation. Eyrolles.
- [14] Légeron, F., Paultre, P., & Mazars, J. (2005). Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 131(6), 946-955.
- [15] Gibbs, J., Cull, W., Henderson, W., Daley, J., Hur, K., & Khuri, S. F. (1999). Preoperative serum albumin level as a predictor of operative mortality and morbidity: results from the National VA Surgical Risk Study. *Archives of surgery*, 134(1), 36-42.
- [16] Sarout, J., Molez, L., Guéguen, Y., & Hoteit, N. (2007). Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: Experimental and theoretical investigations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(8), 896-906.
- [17] Goual Idriss << comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat application en construction routière>> (2012).
- [18] Zaidi.F , Souiah.S <<Etude de comportement mécanique d'un béton ordinaire élaboré par substitution partielle du sable alluvionnaire par du tuf calcaire>> (2015).
- [19] Cherrak et AL
- [20] Menadi.B, Kenai.S, Khatib.J, Ait-mokhtar.A, << Strength and durability of concrete incorporation crushed limestone sand. *Constr Build Mater*>> 2009;23(2):625\_33.
- [21] Kenai.S, Debieb.F,<< caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés>>. *Mater Struct* 2011 ;44(4) :815\_24.

- [22] Hebhouh.H, Aoun H, Belachia M, Houari H, Ghobel E, <<Use of waste marble aggregates in concrete. Constr Build Mater>> 2011;25(3):1167\_71.
- [23] Benachour Y, Davy CA, Skoczylas F, Houari H, <<effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar.Cem coner Res>> 2008;38(6):727-36.
- [24] Domone P.L., Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of the 1stInternational Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Proceedings (PRO 7), Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson Stockholm, Sweden, 1999, pp. 109 – 120
- [25] Benabed Benchaa influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat universitaire de laghouat.
- [26] Belaidi .A.S, Contribution à l'étude rhéologique et durabilité e béton autoplaçant : apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels, thèse de doctorat, université de Blida, 2013 ,
- [27] EFNARC, the European guidelines for self-compacting concrete, European federation for specialist construction chemicals and concrete systems, 2005.www.efnac.org.
- [28] GranDubé, Grandeurs associées à la durabilité des bétons, sous la direction de G, Arliguie et H.Hornain, Presses de l'ENPC, 2007 ;
- [29] Okamura H, Ouchi M, Self-compactiing concrete, Develpment, resent use and future proceedings of the first International RILEM Symposium on S-Compacting Concrete, Stokhlom, Suède PP, 3-14, 1999 ;
- [30] Okamura H, and Ozawa K, Fine mortar rhélogy in Mix-design for self-compacting concrete, Concrete Library of JSCE 1995 ; 25 ; 107-120 ;
- [31] Okamura H, Ferguson lecture for 1996 : Self-compacting high-performance concrete, Concrete International 1997 ; 19(7) : 50-54

[32] EFNARC, The European guidelines for self-compacting concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005, p. 68