

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département de Génie Civil*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Génie civil**

**Spécialité : Matériaux en Génie Civil**

Par

- **ZIAINA Abdenacer**
- **GHAZALI Marouan**

*Intitulé*

***Optimisation d'un béton autoplaçant à base de céramique par modélisation***

*Soutenu le : 27/06/2022.*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. ROKBANE Abdelmadjid</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme TABET Souad</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. LOGZIT Nacer</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. KESSAL Oussama</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۴۳۸



# Remerciement

*Remercions ALLAH de nous avoir donné la capacité d'écrire et de penser, le pouvoir sur la foi, la santé, la patience pour aller au bout d'un rêve.*

*Merci*

*Nous remercions sincèrement notre superviseur, Mme Tabet Souad, qui nous a guidés pendant la préparation de notre mémoire et qui nous a donné tout le temps et les instructions nécessaires pour effectuer ce travail.*

*À tous nos professeurs, chacun en son nom, nous vous remercions du fond du cœur pour votre dévouement et vos conseils.*

*À tous les ingénieurs de laboratoire et à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce projet de fin d'études.*

*À M. Kassel Osama, qui nous a donné tous les conseils nécessaires à la fin du projet d'étude*

## Dédicace

*Je dédie travail*

*À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui  
N'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour  
me rendre heureux*

*À mon adorable mère SALIMA.*

*Chère grand-mère, miséricorde d'Allah.*

*À ma sœur, je te souhaite le mieux dans ta vie.*

*À mes tantes et mes oncles merci pour le soutien surtout ma tante  
Nedjma.*

*À tout membres de ma famille qu'on voulait voir en moi le fruit d'un long  
Sacrifice, plein de patience d'amour.*

*À mon frère Abdenacer bon courage dans ta vie*

*À mes chers amis.*

*À tous ceux qui sèment le bonheur sur mon chemin.*

*Marouan.*



## Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents pour leur soutien, leur patience et leurs encouragements au cours de ma carrière scolaire et pour le soutien à mes frères et sœurs et pour toute ma famille. À mon ami Marouan, qui m'a soutenu tout au long de ma carrière universitaire, et à tous les enseignants qui m'ont mené au succès.*

*Abdenacer*



**SOMMAIRE**

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des abréviations .....	iii
Résumé – Abstract – ملخص .....	iv
Introduction générale.....	1

**CHAPITRE I : Caractéristiques des bétons autoplaçants**

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition du béton auto plaçant.....	2
I.3. Historique des bétons auto plaçant .....	2
I.4. Domaine d'utilisation des BAP .....	3
I.5. Avantages et inconvénients du béton autoplaçant.....	3
I.5.1. Avantages techniques.....	3
I.5.2. Avantages économiques.....	4
I.5.3. Avantages écologiques.....	4
I.6. La spécificité de la composition des BAP .....	4
I.6.1. Un volume de pâte élevé.....	4
I.6.2. Une quantité de fines élevée .....	4
I.6.3. L'utilisation de superplastifiants .....	5
I.6.4. un faible volume de gravillons.....	5
I.6.5. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité) .....	5
I.7. Constituants des BAPs.....	5
I.1.7.1. Le ciment.....	6
I.1.7.2. Les granulats .....	6
I.7.3. Les additions minérales.....	6
I.7.3.1. Les fillers calcaires.....	6
I.7.3.2. Poudre atomisée pour production de céramique .....	7
I.7.4. Les adjuvants.....	7
I.7.4.1. Les superplastifiant .....	8
I.7.4.1.1. Mode d'action des superplastifiants.....	8
I.1.7.4.2. Les agents de viscosité.....	9
I.1.8. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	9
I.1.8.1. la capacité de remplissage (fluidité).....	9
I.1.8.2. La résistance à la ségrégation.....	10
I.1.8.3. La capacité de passage .....	10

I.1.9. Propriétés des BAP à l'état durci .....	10
I.1.9.1. Résistance mécanique .....	10
I.1.10. Différentes approches de formulation des BAPs .....	11
I.11. Caractérisation des BAP à l'état frais .....	11
I.11.1. Essai d'étalement .....	11
I.11.2. Essai de boîte en L .....	12
I.11.3. Essai de stabilité au tamis .....	12
I.11.4. La rhéologie .....	12
I.11.4.2. Les grandeurs de rhéologie .....	13
I.12. Caractérisation des BAP à l'état durci .....	14
I.12.1 Les essais destructifs .....	14
I.12.1.1. La résistance à la compression .....	14
I.12.1.2. traction par flexion .....	14
I.12.2. les essais non destructif .....	14
I.12.2.1 Essai de scléromètre .....	14
I.12.2.2. Essai d'auscultation sonore .....	14
I.13. Fabrication, transport et mise en place des BAPs .....	15
I.13.1. Fabrication .....	15
I.13.2. Transport .....	15
I.13.3. Mise en place des BAPs .....	15
I.14. Conclusion .....	15
<b>CHAPITRE II : Plan d'expérience et modélisation</b>	
II.1. Introduction .....	16
II.2. Définition .....	16
III.3. Utilisation plan d'expérimental .....	16
II.4. Démarche méthodologique .....	17
II.5. Vocabulaire de base des plans d'expériences .....	18
II.6. Notion d'espace expérimental .....	18
II.7. Notion de surface de réponse .....	20
II.8. Méthodologie des plans d'expériences .....	20
II.8.1. La recherche des facteurs influents .....	20
II.8.2. La modélisation .....	20
II.8.3. Optimisation .....	20
II.9. différents types des plans d'expériences .....	21

II.10. Présentation logiciel «JMP» .....	21
II.11. Conclusion .....	21

## **CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux utilisés et formulation**

III.1. Introduction .....	22
III.2 Présentation des matériaux utilisés .....	22
III.3 Caractéristiques des matériaux utilisés .....	22
III.3.1 le sable .....	22
III.3.1.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650] .....	22
III.3.2. Les caractéristiques physiques .....	24
III.3.2 gravier .....	25
III.3.2.1 Analyse granulométrique .....	25
III.3.2.2. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés .....	25
III.3.2.3 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés .....	26
III.4. CIMENT (CEM II/B 42,5) .....	27
III.4.1.2. Caractéristiques physiques du ciment utilisé EN 196-1 .....	27
III.5. Les Fillers de calcaire .....	27
III.6. Poudre de céramique .....	28
III.7. Les adjuvants .....	28
III.7.1. Définition .....	28
III.7.2. Dosage en super plastifiant .....	29
III.8. L'eau de gâchage .....	29
III.9. Formulation de béton auto plaçant par la méthode AFGC .....	29
III.9.1. Choix des constituants pour formuler notre BAP .....	29
III.9.3. Calcul des composantes des mélanges pour un mètre cube (1000 litres) .....	30
III.10. Procédures de fabrication des BAPs .....	32
III.11. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais .....	33
III.11.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams : [NFEN12 350-8] .....	33
III.11.2. L'essai de la boîte en L : [NF EN 12 350-10] .....	33
III.11.3 Stabilité au tamis : [NF EN 12 350-11] .....	34
III.11.4 Essai rhéomètre .....	34
III.12. Confection des éprouvettes .....	34
III.12.1. type et taille des moules .....	34
III.12.2. Conservation des éprouvettes .....	35

III.13. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci .....	35
III.13.1. Les essais destructifs .....	35
III.13.2. Les essais non destructifs .....	36
III.14. Conclusion.....	37

## **CHAPITER IV : Analyse et modélisation des résultats**

Partie 01 : Résultats et interprétations.....	38
IV.1.Introduction.....	38
IV.2. Résultats des essais à l'état frais .....	38
IV.2.1 Résultats des essais de caractérisation des BAPs.....	38
IV.2.2 Comportement rhéologique des BAPs.....	42
IV.3. Résultats des essais à l'état durci .....	44
IV.3.1. Les essais destructifs .....	44
IV.3.1. 1. La résistance à la compression.....	44
IV.3.1. 2. La résistance à la traction par flexion.....	47
IV.3.2. Les essais non destructifs .....	49
PARTIE 02 : MODELISATION ET ANALYSE DES RESULTATS .....	50
IV.4. Modélisation et Analyse des résultats à l'état frais.....	50
IV.4.1. Les essais de caractérisation à l'état frais .....	50
IV.5. Modélisation et Analyse des résultats à l'état durci .....	52
IV.5.1. Résultats de la résistance à la compression $R_c$ à 7, 14 et 28 jours .....	52
IV.5.2. Résultats de la résistance à la traction par flexion $R_f$ à 7, 14 et 28 jours .....	54
IV.6. Conclusion.....	56
Conclusion générale .....	57
Liste des références bibliographiques	

## Liste des tableaux

Tableau III 1. Analyse granulométrique du sable.....	23
Tableau III.2: Classification du sable en fonction du module de finesse .....	24
Tableau III.3 Les caractéristiques physiques du sable utilisé.....	24
Tableau III.4 L'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16.....	25
Tableau III.5. Les caractéristiques physiques de gravier utilisé.....	26
Tableau III.6. Classification des roches en fonction du coefficient LA .....	26
Tableau III.7. Les compositions chimique et minéralogique du CEM II/B 42.5 .....	27
Tableau III.8. Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5 .....	27
Tableau III.9. Les compositions chimiques et les propriétés physiques du calcaire .....	28
Tableau III.10 Caractéristiques de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 » .....	28
Tableau III.11.formulation des BAP de rapport G/S=0.95 par la méthode LCPC.....	31
Tableau III.12. formulation des BAP de rapport G/S=0.85 par la méthode LCPC.....	32
Tableau IV.1. L'essai de scléromètre (laboratoire GC).....	39
Tableau IV.2. La résistance à la compression des BAP. ....	45
Tableau IV .3. Résultats de la Résistance à la flexion.....	47
Tableau IV.4. la vitesse de propagation des ultras son pour les BAP à 28 jours. ....	49

## Liste des figures

Figure I.1 application de béton fluide (guide de béton.com/image) .....	2
Figure I.2 Exemples d'utilisation de BAP .....	3
Figure I.3. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle. ....	5
Figure I.4 Défloculation de ciment par le superplastifiant [17]. ....	9
Figure II.1 Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. Boukli Hacene, 2010].....	17
Figure II.2. Domaine du facteur .....	18
Figure II.3.Espace expérimental.....	19
Figure II.4.Point expérimental .....	19
Figure II.5. Domaine d'étude .....	19
Figure II.6. Surface de réponse .....	20
Figure III.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf.....	23
Figure III.2. Courbes granulométriques du gravier 8/16 et 3/8.....	25
Figure III.3. Détermination du point de saturation au mini cône de Marsh.....	29
Figure III.4. L'essai d'étalement (laboratoire de génie civil).....	33
Figure III.5. L'essai de la boîte en L (laboratoire GC).....	33
Figure III.6. L'essai stabilité au tamis (laboratoire GC). ....	34
Figure III.7. Essai rhéomètre (laboratoire GC). ....	34
Figure III.8. Bague de conservation des éprouvettes (laboratoire GC).....	35
Figure III.9. L'essai de compression (au laboratoire GC).....	35
Figure III.10. L'essai de la résistance à la traction par flexion (laboratoire GC).....	36
Figure III.11. L'essai d'ultrason (laboratoire GC) .....	36
Figure III.12. L'essai de scléromètre (laboratoire GC).....	37
Figure IV.1. Résultats de l'essai de l'étalement.....	39
Figure IV.2 Résultats de l'essai de l'écoulement .....	40
Figure IV.3 Résultats de l'essai de Stabilité au tamis .....	40
Figure IV.4. Les variations de la masse volumique des différents BAP formulés.....	41
Figure IV.5. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour G/S=0,95 .....	42
Figure IV.6. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour le rapport G/S=0.85. ....	43
Figure IV.7. Les variations de la viscosité des différents BAP formulés .....	44
Figure IV.8. Résistance à la compression des BAPs à 7, 14 et 28 jours. ....	46
Figure IV.9. histogrammes des résistances à la flexion pour les différents âges de BAP .....	48
Figure IV.10. Vitesse du son des différents types de béton. ....	49
Figure IV.11. Histogrammes des résistances au scléromètre. ....	50
Figure IV.12. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	51
Figure IV.13. Curseur de la grille de réponse des essais à l'état frais.....	52
Figure IV.14. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression .....	53
Figure IV.15. Curseur de la grille de réponse de la résistance à la compression.....	54
Figure IV.16. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la traction par flexion.....	55
Figure IV.17. Curseur de la grille de réponse de la résistance à la traction par flexion.....	56

## Liste des abréviations

**AFGC** : Association française de génie civil.

**LCPC** : Laboratoire central des ponts et chaussées

**BAP** : Béton auto plaçant.

**BO** : Béton ordinaire.

**Mf** : module de finesse du sable.

**SP** : super plastifiant.

**PAC** : poudre Atomisée céramique ou tout court PC.

**Rc** : La résistance mécanique à la compression.

**R<sub>f</sub>** : la résistance à la traction par flexion

**G** : Gravier.

**S** : Sable.

**G/S** : est le rapport gravier/sable.

**E** : Eau.

**C** : Ciment.

## Résumé

Dans cette étude, on va analyser l'influence du rapport G/S, qui est pris égal à 0,95 et 0,85, sur les performances rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant modifié et ce en remplaçant partiellement la masse de ciment par différentes masses en pourcentage (2, 7 et 14%), de poudre atomisée pour céramique (PAC), utilisée dans le domaine de construction.

L'ajout de PAC est très bénéfique pour certains dosages inférieurs à 14%.

Les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir une viscosité aussi bonne.

**Mots clés :** béton autoplaçant – rhéologie– céramique.

## Abstract

In this study, we will analyze the influence of the G/S ratio, which is taken equal to 0.95 and 0.85, on the rheological and mechanical performance of a modified self-compacting concrete and this by partially replacing the mass of cement by different masses in percentage (2, 7 and 14%), of atomized powder for ceramics (APC), used in the field of construction.

The addition of APC is very beneficial for certain dosages below 14%.

The mixtures were fluid enough to have such good viscosity.

**Keywords:** self-compacting concrete – rheology – ceramics.

## ملخص

في هذه الدراسة، سنقوم بتحليل تأثير النسبة ، والتي تُؤخذ تساوي مرة 0,95 و 0,85 في مرة أخرى، على الأداء الريولوجي والميكانيكي للخرسانة ذاتية الضغط المعدلة، عن طريق استبدال كتلة الأسمنت جزئيًا بكتل مختلفة في النسبة المئوية (2% , 7% , 14%) من مسحوق معد لصناعة السيراميك الذي يستخدم في مجال البناء.

تعد إضافة مسحوق السيراميك مفيدة جدًا لجرعات معينة أقل من 14%.

كانت المخاليط سائلة بدرجة كافية للحصول على مقدار من اللزوجة الجيدة.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المضغوطة ذاتيا - الريولوجيا - السيراميك

# Introduction générale

## **Introduction générale**

Le béton autoplaçant (BAP), développé la première fois au Japon vers les années 80, présente une grande fluidité et peut s'écouler sous son propre poids sans vibration à travers des zones confinées (armatures, coffrages de formes complexes). Sa résistance à la compression est très remarquable par rapport à un béton classique.

Les études d'optimisation de la formulation des BAP ont pour objectif d'obtenir une formule fiable et robuste facilement contrôlable sur chantier. Le principe de formulation vise à réduire le seuil de cisaillement du béton en lui conservant une viscosité suffisante pour éviter tout risque de ségrégation et de ressuage.

Et comme la formulation de ces bétons s'appuie sur des approches très variables nous avons choisi pour notre recherche l'approche proposée par l'association française de génie civil AFGC, tout en essayant d'avoir un béton performant et écologique à la fois. Donc on a remplacé partiellement le ciment par de quantités différentes (2, 7 et 14%) de matières premières mélangées et broyées destinées à la fabrication de la céramique qu'on l'appelle poudre atomisée.

Les différents résultats trouvés à l'état frais comme à l'état durci étaient traités mathématiquement par modélisation en utilisant une démarche originale dite plans d'expériences où l'on propose une expression de prévision.

Ce mémoire comporte deux parties principales :

- Une recherche bibliographique sur le béton autoplaçant dans le chapitre I et l'utilisation de la technique des plans d'expériences avec une présentation de logiciel JMP comme deuxième chapitre.
- Une étude expérimentale qui comporte une caractérisation de tous les matériaux utilisés ainsi que les différents essais réalisés pour l'optimisation d'un béton autoplaçant performant avec interprétations et modélisations des résultats dans les chapitres III et IV.

Une conclusion générale clôture notre mémoire où l'on présente les résultats les plus importants et les plus pertinents trouvés pour en tirer une réflexion globale.

*CHAPITRE I*  
*Caractéristiques des bétons*  
*autoplaçants*

## Chapitre I

### Caractéristiques des bétons autoplaçants

#### I.1. Introduction

Les BAP se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs propriétés à l'état frais. La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages, qui n'est pas le cas pour le BAP où la mise en place peut être réalisée sous le seul effet de la gravité sans apport de vibration à cause de sa fluidité.

Dans ce chapitre nous étudierons le BAP et sa caractérisation et les différents constituants utilisés pour confectionner ce béton.

#### I.2. Définition du béton auto plaçant

Ce sont des bétons très fluides en écoulement, homogènes et stables, et se mettent en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions. Ils sont très déformable et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes grâce à leurs bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables [1].



*Figure I.1. Application de béton fluide [2].*

#### I.3. Historique des bétons auto plaçant

L'histoire et le développement du BAP peuvent être divisés en deux étapes clés : son développement initial au Japon à la fin des années 1980 et son introduction ultérieure en Europe par la Suède au milieu et la fin des années 1990.

Les premières publications de recherche qui ont examiné les principes requis pour le BAP provenaient de l'Université de Tokyo par Ozawa et al en 1992. Ces études se sont concentrées telles que la capacité de remplissage, la fluidité et la résistance à la ségrégation.

L'une des premières références publiées utilisant le terme auto-compactage a été publiée au Japon en 1995 [3].

#### **I.4. Domaine d'utilisation des BAP**

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc) [4].

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- Densités de ferrailage importantes.
- Formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière [5].



Application du BAP dans les planchers



application du BAP dans la préfabrication

*Figure I.2. Exemples d'utilisation de BAP [6].*

#### **I.5. Avantages et inconvénients du béton autoplaçant**

##### **I.5.1. Avantages techniques**

- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante.

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton.
- Réalisation des éléments de forme complexe.

### **I.5.2. Avantages économiques**

- Une économie de main d'œuvre dans le chantier.
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

### **I.5.3. Avantages écologiques**

- Valorisation des déchets de construction, (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, carrières, station de concassages).
- Diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [7].

## **I.6. La spécificité de la composition des BAP**

Il existe plusieurs approches de formulation des BAP qui diffèrent légèrement entre elles tout en gardant ses caractéristiques (stabilité, fluidité,...). Pour cela, il est nécessaire d'ajouter un agent de viscosité, d'augmenter la quantité des ajouts minéraux et de choisir des teneurs appropriées de sable et de granulats [7].

La composition de ce type de béton doit avoir certaines critères soit :

### **I.6.1. Un volume de pâte élevé**

En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité de pâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires et confère au matériau sa fluidité. Le rôle de pâte (ciment+ addition+ eau efficace+ air occlus) et d'écarter les granulats, son volume dans le BAP est donc élevé [8].

### **I.6.2. Une quantité de fines élevée**

La composition de BAP comporte une quantité de fines très importante (qui peut atteindre environ 500kg/m<sup>3</sup> de diamètre inférieur à 80 µm) pour assurer la maniabilité et limiter les risques de ressuage et de ségrégation. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité dans la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques du béton.

### I.6.3. L'utilisation de superplastifiants

Afin de modifier la fluidité d'un BAP il nécessaire d'utiliser un superplastifiant, ce dernier augmente l'ouvrabilité du béton mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

### I.6.4. un faible volume de gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. Pour les BAP le rapport massique gravier/ sable (G/S) est proche de 1 [8].

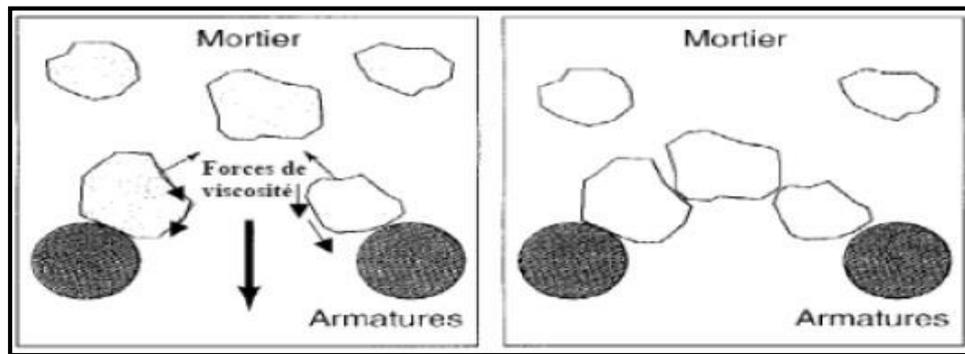


Figure. I.3. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [9].

### I.6.5. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui augmentent la viscosité de l'eau. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risque de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse [10]. Ces adjuvants semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant le rapport eau/liant faible [11].

## I.7. Constituants des BAPs

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des bétons ordinaires. Étant donné le mode de mise en place des BAP, on classe 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.

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP.

#### **I.1.7.1. Le ciment**

On distingue **5 types de ciments**, selon les constituants utilisés et leurs proportions [12].

- CEM I: Ciment Portland (CPA).
- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment composé (CLC).

#### **I.1.7.2. Les granulats**

- Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés.
- Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les concassés.
- Le rapport G/S est d'ordre de 1.
- Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage on limite en générale le diamètre maximal des granulats à 20mm.

#### **I.7.3. Les additions minérales**

Une addition minérale pour béton est un matériau finement divisé, généralement de granularité inférieure à 100 $\mu$ m, utilisé dans la formulation des bétons hydrauliques. Elle est incorporée dans le béton lors de sa fabrication pour améliorer certaines de ses propriétés (ouvrabilité, consistance) ou pour lui conférer des propriétés particulières : compacité, durabilité, tenue à des environnements agressifs... [13].

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

Les pouzzolanes naturelles, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, les cendres volantes, les fillers de calcaire ou encore des matériaux recyclés. On va traiter uniquement les additions sujet de cette recherche.

##### **I.7.3.1. Les fillers de calcaire**

Les fillers peuvent être utilisés soit en substitution partielle du ciment selon le concept de liant équivalent soit en complément du ciment.

L'ajout de filler dans une formule béton présente un intérêt triple : **économique, technique et environnementale.**

**Les fillers calcaire apportent une correction granulaire :**

- pour garantir la fluidité des bétons autoplaçant et faciliter leur pompage.
- pour diminuer la porosité finale des bétons donc améliorer leur résistance mécanique, leur durabilité et l'esthétique des parements (diminution de la rugosité de surface) [14].

**I.7.3.2. Poudre atomisée pour production de céramique**

La production demande normalement la préparation d'une poudre où sont mélangées des matières premières oxydées en vue d'obtenir la composition chimique définie pour le produit. Les étapes suivantes sont nécessaires pour avoir une poudre atomisée [15] :

- Mélange des matières premières en proportions bien précises en poids dont on cite les argiles blanches (facile à mettre en place et à modeler), les argiles kaoliniques, le quartz (sable) pour la rigidité du produit, Feldspath (qui se vitrifie sous l'effet de la chaleur).
- Broyage humide des matières premières dans une énorme machine. On obtient ainsi une pâte liquide toute fine que l'on appelle la barbotine.
- L'atomisation A l'aide d'une pompe à ultra haute pression, la barbotine est amenée jusque dans l'atomiseur. Le rôle de l'atomiseur est de séparer l'eau du reste de la préparation afin d'en obtenir une poudre. Pour réaliser cette opération, la barbotine est propulsée en fines particules par des buses et est envoyée dans un courant d'air chaud.
- La barbotine est ainsi immédiatement séchée, la poudre atomisée est prête pour produire des carreaux de céramiques.

**I.7.4. Les adjuvants**

L'utilisation des super plastifiants en combinaison avec les ajouts cimentaires ont ouvert plusieurs voies technologiques intéressantes telles que : les bétons à hautes performances, les bétons auto plaçant et les bétons à poudres réactives.

Les agents réducteurs d'eau ordinaires tels que les lino sulfonates sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau/ciment de 0,40 ou plus. Quand une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de super plastifiants est recommandé [16].

#### **I.7.4.1. Les superplastifiant**

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide, ils sont des produits organiques, et leur utilisation a pour objet d'améliorer l'ouvrabilité du béton, donnée une très bonne maniabilité, en diminuant son seuil de cisaillement et sa viscosité. Et doivent également assurer un maintien de rhéologie dans le temps, jusqu'à la mise en place (temps de confection et de transport, mise en place jusqu'au début de prise) [17].

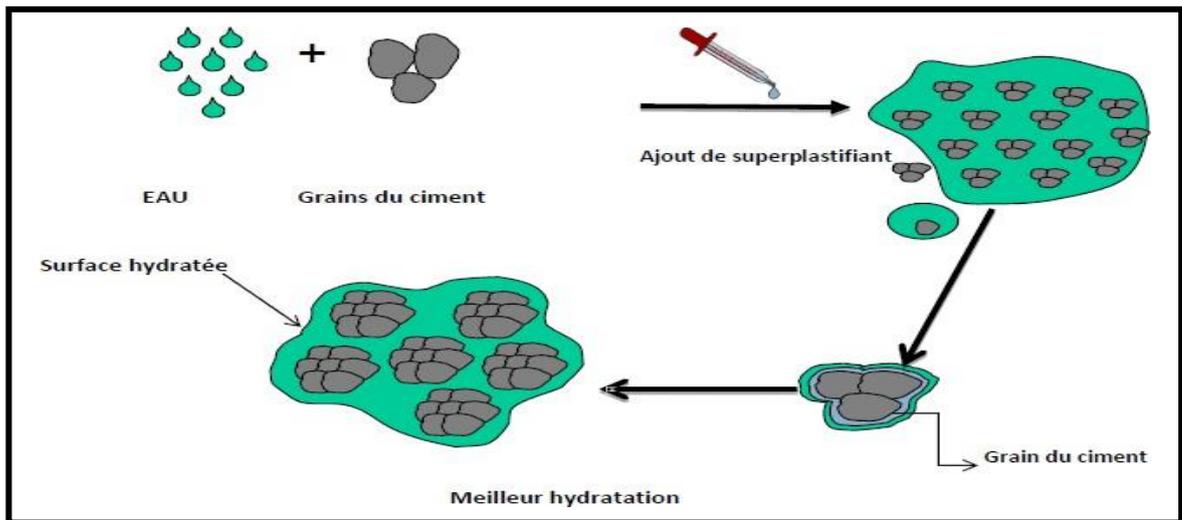
##### **I.7.4.1.1. Mode d'action des superplastifiants**

Les super plastifiants interagissent avec les particules de ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est importante.

Les super plastifiants sont des molécules polaires qui présentent une extrémité fortement chargée, qui vient neutraliser un site opposé sur les grains de ciment.

Généralement, les grains de ciment anhydres sont chargés électriquement à leur surface, du fait de la rupture de liaisons électriques entre les cations et les anions pendant le broyage [18]. Il est observé que les grains de ciment anhydres sont plus chargés négativement que positivement à la sortie des broyeurs. Il existe une certaine cohésion entre les grains de ciment qui les maintient « collés » les uns aux autres formants des floccs. Cette cohésion est associée à des phénomènes d'attraction électrique entre plages de signes différents à la surface des grains ainsi qu'à des forces moins spécifiques dites de Van Der Waal [19].

Les polymères viennent alors s'adsorber sur les surfaces chargées et dispersent les floccs de ciment. Le défoulant ajouté en quantité non négligeable libère les particules de ciment entre elles en cassant les forces capillaires dans le cas de formation de ménisques d'eau ou les forces électrostatiques de Van der Waal dans le cas de floccs formés à partir des charges électriques des particules de ciment. Celui-ci permet ainsi de supprimer un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment [20].



*Figure I.4 Défloculation de ciment par le superplastifiant [20].*

#### **I.1.7.4.2. Les agents de viscosité**

L'ajout d'un super plastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais à tendance à réduire sa viscosité, le matériau devient alors moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. Pour minimiser cet effet l'ajout d'un agent de viscosité s'avère nécessaire [8].

Les agents de viscosité diminuent la ségrégation et le ressuage du béton dû à un fort dosage en super plastifiant.

#### **I.1.8. Caractérisation des BAP à l'état frais**

Les propriétés générales d'un béton auto plaçant 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 : la capacité de remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [21].

##### **I.1.8.1. la capacité de remplissage (fluidité)**

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto plaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abram donne des indications sur les deux aspects [22].

### **I.1.8.2. La résistance à la ségrégation**

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions.

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus [22].

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. L'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité indépendamment des solides dans le mélange. Ceci à l'extrême se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton. Des matériaux de surface granulaire plus élevée peuvent par absorption et adsorption retenir une quantité supplémentaire d'eau libre.

### **I.1.8.3. La capacité de passage**

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois (la fluidité) la capacité de remplissage et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité des granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armature ou dans un confinement.

## **I.1.9. Propriétés des BAP à l'état durci**

### **I.1.9.1. Résistance mécanique**

Le BAP possède une structure plus homogène que le béton ordinaire (BO) vibré.

Grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée, les BAP présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un BO [23].

L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure plus dense (par effet physique principalement). Ces effets ont une influence

sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite [23].

### **I.1.10. Différentes approches de formulation des BAPs**

Vu que les méthodes de formulation classiques ne sont pas adaptées aux BAP, car elles ne prennent pas en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP, plusieurs approches de formulation sont développées à travers le monde. La plupart des méthodes de formulation sont conçues actuellement de manière empirique. Ces méthodes se basent essentiellement sur des études expérimentales effectuées sur des BAP.

Parmi ces méthodes on cite :

- L'approche basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires ;
- L'approche basée sur l'optimisation de mortier ou de la pâte ;
- L'approche basée sur le rassemblement des deux approches précédentes.

Quant à l'AFGC (association française de génie civil), elle recommande l'utilisation des dosages suivants :

- Un rapport gravier/sable (G/S) proche de 1 ;
- Un rapport eau/ciment (E/C) proche de 0.5;
- Un dosage en ciment supérieur ou égal à 300 kg/m<sup>3</sup> ;
- $330 \text{ (l/m}^3) \leq \text{volume de pâte} \leq 400 \text{ (l/m}^3)$  ;
- $120 \text{ (kg/m}^3) \leq \text{masse d'addition} \leq 200 \text{ (kg/m}^3)$  [24].

### **I.11. Caractérisation des BAP à l'état frais**

La caractérisation des BAP est nécessaire, cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir plusieurs tests d'ouvrabilité qui caractérisent ce béton.

#### **I.11.1. Essai d'étalement**

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams. Des valeurs de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP.

### **I.11.2. Essai de boîte en L**

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peuvent se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H_2/H_1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP [25].

### **I.11.3. Essai de stabilité au tamis**

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité du béton (2 litres ou 4.8kg).

Sur un tamis de maille 5mm avec une hauteur du chute de 50cm. le pourcentage en poids de laitance ayant traversée le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10% et 20%.

### **I.11.4. La rhéologie**

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées.

Le but de la rhéologie est de décrire les relations entre la contrainte, la déformation et les vitesses des déformations d'un élément de volume [26].

Des chercheurs et des industrielles considèrent de plus en plus l'application de cette science comme l'un des axes fondamentaux pour la conception de nouveaux produits en ciment et le contrôle de la qualité des bétons existants.

#### **I.11.4.1. Rhéomètre**

Un rhéomètre est un instrument de laboratoire utilisé pour mesurer la façon dont un liquide, un mélange ou une suspension s'écoule sous l'action de forces externes. Il est utilisé pour les fluides qui ne peuvent pas être définis avec une seule valeur de viscosité et nécessitent donc plus de paramètres qu'un viscosimètre ne peut fournir. Mesurer la rhéologie du fluide est la rhéométrie qui est une quantification expérimentale des propriétés rhéologiques des matériaux (viscosité, module de rigidité, etc.) [27].

### I.11.4.2. Les grandeurs de rhéologie

Généralement les bétons présentent un comportement viscoplastique Binghamien. La loi de comportement des BAP, s'écrit comme suit :

$$\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma}$$

Où :

$\tau$  (Pa) : la contrainte de cisaillement.

$\tau_0$  (Pa) : le seuil de cisaillement.

$\mu$  (Pa.s) : la viscosité plastique.

$\dot{\gamma}$  (1/s) : le taux (vitesse) de cisaillement.

#### a) – contrainte de cisaillement $\tau$ [Pa]

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'arrivée de contraintes  $\tau$ , qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche [28].

#### b) – vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ [s<sup>-1</sup>]

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre 2 plans parallèles de surface séparés d'une distance  $h$ . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance  $dx$  à une vitesse constante de norme  $V_0$ .

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse.

Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Ils se créent un gradient de vitesse entre les deux plans [29].

#### c)- viscosité dynamique $\mu$ [Pa.s]

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle, le coefficient de viscosité est défini par la relation suivante :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance satisfait parfois à caractériser le comportement

rhéologique du matériau.

#### **d)- seuil de cisaillement $\tau_0$**

Le seuil de cisaillement  $\tau_0$  est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour qu'un fluide, soumis à une déformation de cisaillement, s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes) [29].

## **I.12. Caractérisation des BAP à l'état durci**

### **I.12.1 Les essais destructifs**

#### **I.12.1.1. La résistance à la compression**

L'essai de compression consiste à soumettre des éprouvettes de béton cubique à diamètre (10) × (10) cm<sup>3</sup> à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On note la charge maximale atteinte P (KN) et la surface de chargement S (m<sup>2</sup>). Et la contrainte maximale.

#### **I.12.1.2. traction par flexion**

L'essai de résistance à la traction par flexion est effectué en conformité avec la méthode qui consiste à soumettre des éprouvettes prismatique, reposant sur deux appuis, a une charge croissante concentrée au milieu jusqu'à la rupture.

### **I.12.2. les essais non destructif**

#### **I.12.2.1 Essai de scléromètre**

Le scléromètre est un appareil relativement simple d'utilisation, il est destiné à mesurer, indirectement, la résistance à la compression du béton à partir de la mesure de sa dureté superficielle. Il existe une relation empirique de corrélation entre cette résistance et un indice dit " indice sclérométrique " et qui consiste à traduire la dureté du béton [30].

#### **I.12.2.2. Essai d'auscultation sonique**

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) la quelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend avec capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digital du

temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs, la vitesse d'onde,  $V$ , dans un milieu homogène, isotrope et élastique [31].

## **I.13. Fabrication, transport et mise en place des BAPs**

### **I.13.1. Fabrication**

En principe tous les types des malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAPs.

Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier [7].

### **I.13.2. Transport**

En raison de sa fluidité élevée, le BAP doit être transporté en camion malaxeur. La fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier [32].

### **I.13.3. Mise en place des BAPs**

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton BAP est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes.

- la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m
- utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.
- La mise en place de BAP peut se faire par pompage, par cette méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses [33].

## **I.14. Conclusion**

Cette étude bibliographique constitue un aperçu succinct sur les propriétés et les caractéristiques de la formulation jusqu'à la mise en œuvre d'un béton autoplaçant.

Leurs principales propriétés résident dans le fait qu'ils présentent une bonne résistance à la ségrégation avec une grande capacité de remplissage.

# **CHAPITRE II : Plan d'expérience et modélisation**

## Chapitre II

### Plans d'expériences et modélisation

#### II.1. Introduction

Les essais de mise au point d'un produit ou d'un processus font partie intégrante du métier des ingénieurs. Ceux-ci sont souvent amenés à rechercher des valeurs des paramètres qui définissent les produits ou les paramètres de réglage des moyens de production afin d'obtenir les performances désirées.

Pour cela on utilise la technique du plan d'expériences qui est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser performances du système étudié [34].

#### II.2. Définition

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles .Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (réponse) et des variables (facteur).

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse .Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur [35].

#### III.3. Utilisation plan d'expérimental

Les plans d'expérimental sont utilisé dans les études industrielles en recherche développement on peut notamment citer :

- Elaboration d'une composition d'un matériau
- Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- Industries mécaniques et automobiles
- Industrie métallurgiques

## II.4. Démarche méthodologique

Le schéma ci-dessous présente un organigramme général de traitement des plans d'expériences :

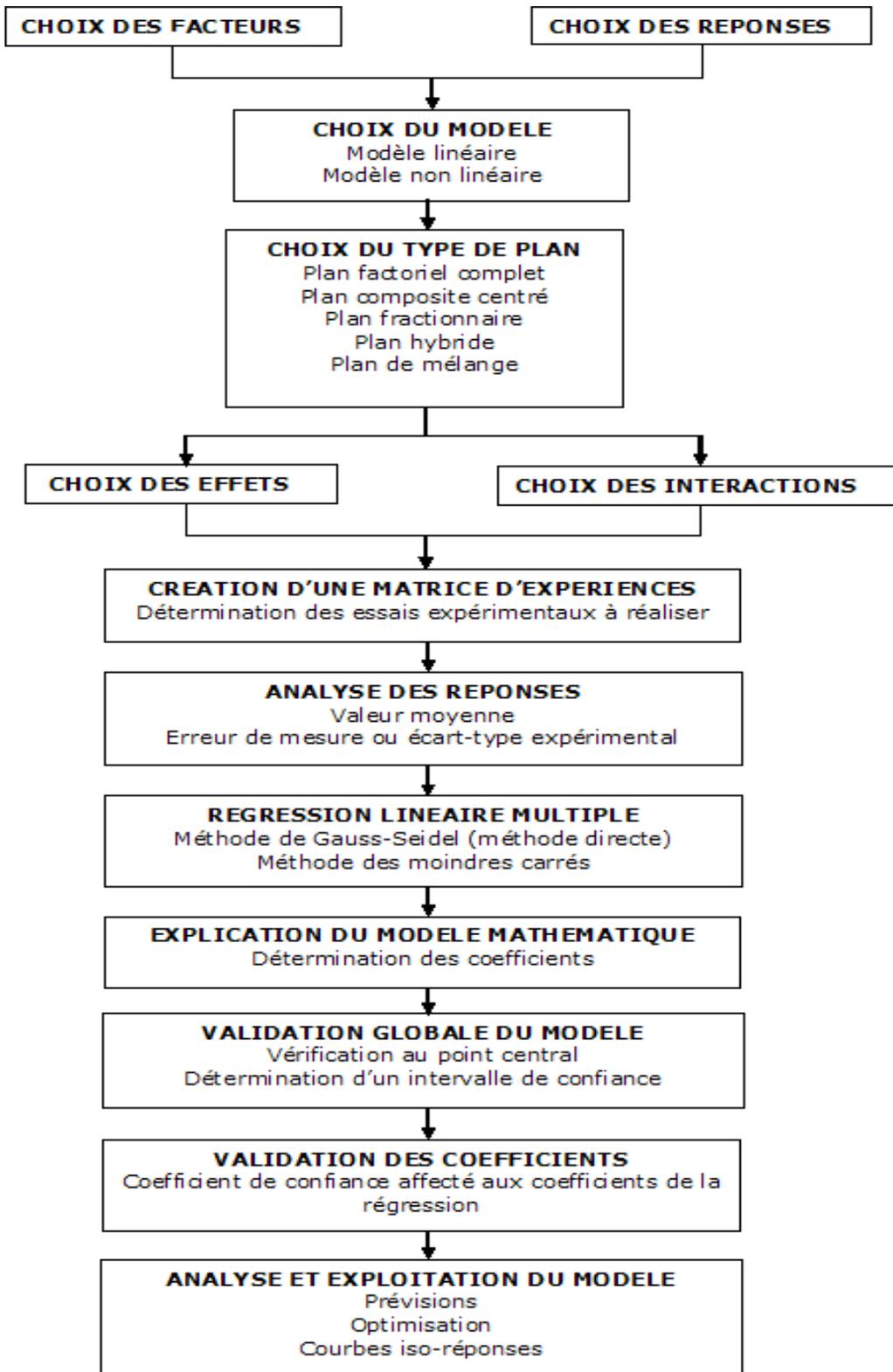
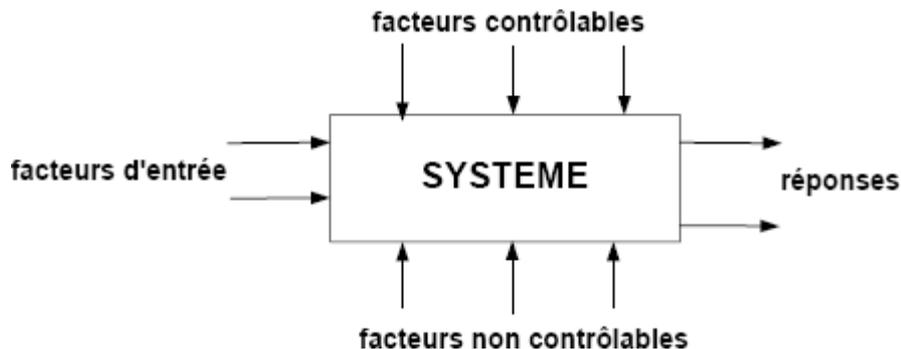


Figure II.1. Organigramme général de traitement des plans d'expériences [36].

## II.5. Vocabulaire de base des plans d'expériences

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier.

Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et ont va ensuite essayer d'établir une relations de cause à effet entre les facteurs et les réponses.



Parmi les facteurs on distinguera :

- les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix (pression, température, matériau ...)
- les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température,...) [36].

## II.6. Notion d'espace expérimental

Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1. le domaine de variation du facteur est constatée de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut [37].

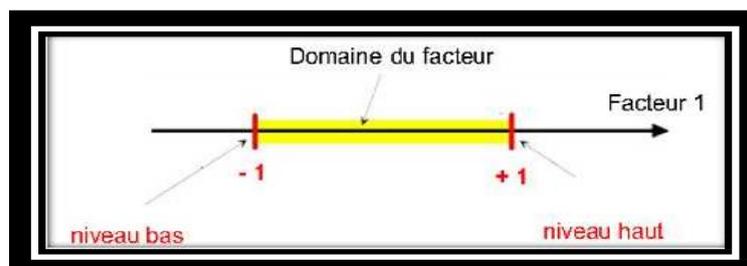
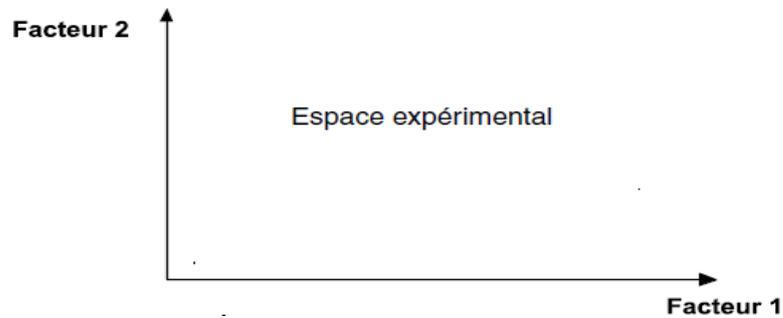


Figure.II.2 Domaine du facteur

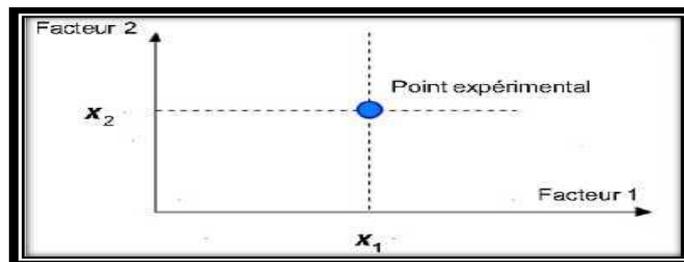
Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté, les deux axes des facteurs sont orthogonaux entre eux.

L'espace ainsi défini est l'espace expérimental présenté comme il est indiqué ci-après :



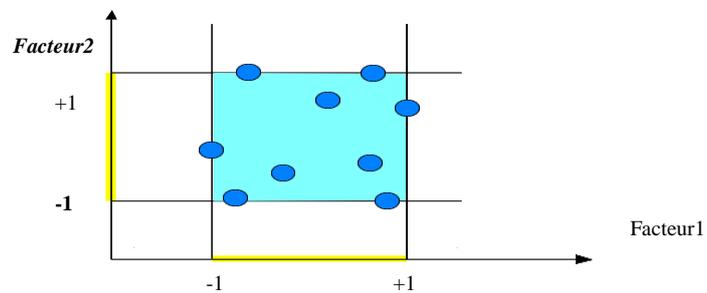
*Figure II.3. Espace expérimental*

Dans l'espace expérimental, niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux comme indiqué ci-dessous :



*Figure. II.4. Point expérimental*

Dans la pratique, expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude [37].



*Figure II.5. Domaine d'étude*

### II.7. Notion de surface de réponse

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble des réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse.

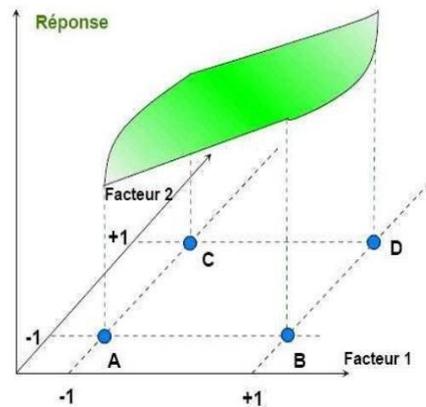


Figure. II.6. Surface de réponse

### II.8. Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes

#### II.8.1. La recherche des facteurs influents

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié.

#### II.8.2. La modélisation

Dans cette phase on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape (linéaire, courbe...), et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation des phénomènes en fonction des facteurs influents.

La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de  $n$  lignes et  $k$  colonnes, où  $n$  est le nombre d'expériences et  $k$  est le nombre des effets.

#### II.8.3. Optimisation

Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié [38].

### II.9. Différents types de plans d'expériences

Trois grandes familles de plans d'expériences :

- Plan factoriel complets à deux niveaux.
- Plan fractionnaire à deux niveaux.
- Plan de mélange.

### II.10. Présentation logiciel « JMP »

**JMP** est un logiciel statique dans lequel une partie des plan d'essai, ce programme d'analyse des données est utilisé par plusieurs centaines de milliers d'explorateur de donnée dans le monde. Son approche interactive et visuelle permet la divulgation d'information impossible à détecter dans des tableaux de formes brutes ou simple graphique statiques. L'utilisation des données est plus efficace grâce à solides fonctions statiques.

Ce logiciel aide à concevoir des stratégies expérimentales optimales, permet de construire des plans expérimentaux et analyser les résultats des expériences. Il s'adapte à toutes sortes de problèmes afin d'atteindre no objectif strictement en tenant compte des contraintes empiriques.

Afin de répondre au plan d'essai ; JMP nous fournit des outils analytiques et indicateurs statiques spécifiques au but rechercher [39].

### II.11. Conclusion

Les Plans d'Expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique. Leur objectif est de réduire au minimum le nombre de mesures expérimentales par rapport à une approche classique, tout en assurant une qualité de résultats, et en obtenant une certaine capacité prédictive grâce à une modélisation mathématique.

**CHAPITRE III**  
**Caractérisation des**  
**matériaux utilisés et**  
**formulation**

## Chapitre III

### Caractérisation des matériaux utilisés et formulation

#### *III.1. Introduction*

Dans ce chapitre nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux locaux utilisés dans l'industrie du béton et les essais ont été effectués au laboratoire de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

#### *III.2 Présentation des matériaux utilisés*

- Un sable de dune provenant d'Oued souf.
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) l'origine carrière<< Mechri BBA>>
- Ciment CPJ 42.5 provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa « M'sila »
- L'adjuvant : le super-plastifiant de MEDAFLOW SP 30 de Granitex.
- Additions minérales : les fillers Calcaire et une poudre atomisée destinée à la fabrication de céramique.
- L'eau de gâchage : eau de laboratoire de génie civil université BBA

#### *III.3 Caractéristiques des matériaux utilisés*

##### *III.3.1 le sable*

##### *III.3.1.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650]*

L'analyse granulométrique, selon la norme [NF EN P18-650], permet de déterminer la grosseur minimale « d » et la grosseur maximale « D » des matériaux entrant dans la composition du béton, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux utilisés pour l'analyse.

L'analyse permet aussi de calculer le module de finesse du matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

Les résultats sont exploités sous forme de tableau et courbe granulométrique :

Tableau III. 1. Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
3.15	2	2	0.20	99.80
2,5	4	6	0.60	99.40
1,25	47	53	5.30	94.70
0,63	162	215	21.50	78.50
0,315	426	641	64.10	35.90
0.16	307	948	94.80	5.20
0,08	46	994	99.40	0.6
Fond	6	1000	100	0.00

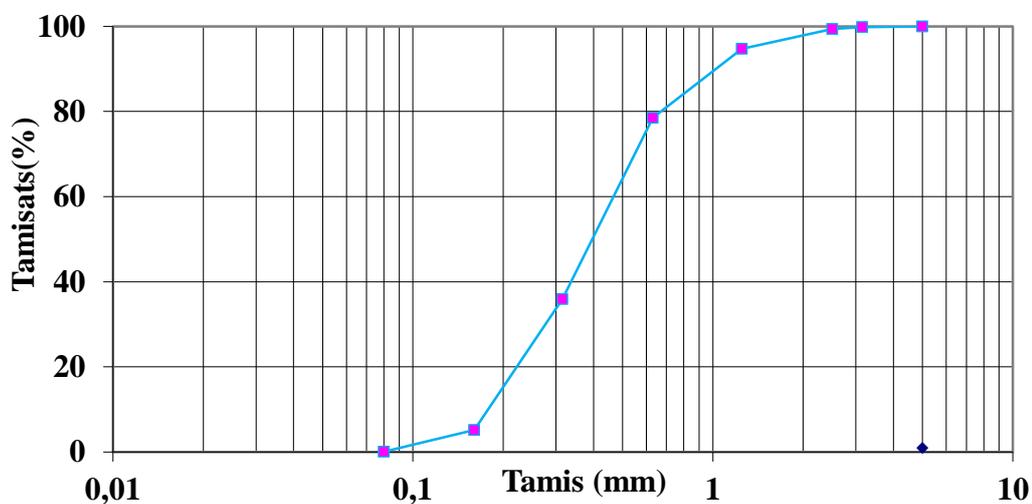


Figure III.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf

On remarque une courbe granulométrique uniforme et bien étalée.

➤ **Module de finesse : [NF EN P 18-304]**

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 3.15mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum R_c / 100$$

Où :  $R_c$  : refus cumulé

Les normes soviétiques spécifient le module de finesse  $M_f$  des sables comme suit :

*Tableau III.2. Classification du sable en fonction du module de finesse*

Qualité du sable	Module de finesse
Sable gros	$>2.5$
Sable moyen	$2 < \grave{a} < 2.5$
Sable fin	$1.5 < \grave{a} < 2$
Sable très fin	$1 < \grave{a} < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant :

$$M_F = \frac{0.2+5.3+21.5+64.1+94.8}{100} = 1.86$$

- Le sable utilisé est considéré comme **un sable fin à moyen**.

### III.3.2. Les caractéristiques physiques

- **Masse volumique spécifique (absolue) [NF EN P 18-555], apparente [NF EN P 18-555], porosité, compacité et indice des vides**

Pour étudier la formulation d'un béton, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques physiques selon les normes recommandées par l'AFGC, Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau III.3.

*Tableau III.3 : Les caractéristiques physiques du sable utilisé*

Caractéristiques physiques	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%) $P = (1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}) \times 100\%$	Compacité (%) $C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	Indice de vides E $E = \frac{P}{C}$
Valeurs moyennes	2.608	1.568	39.877	60.122	0.663

**III.3.2 gravier**

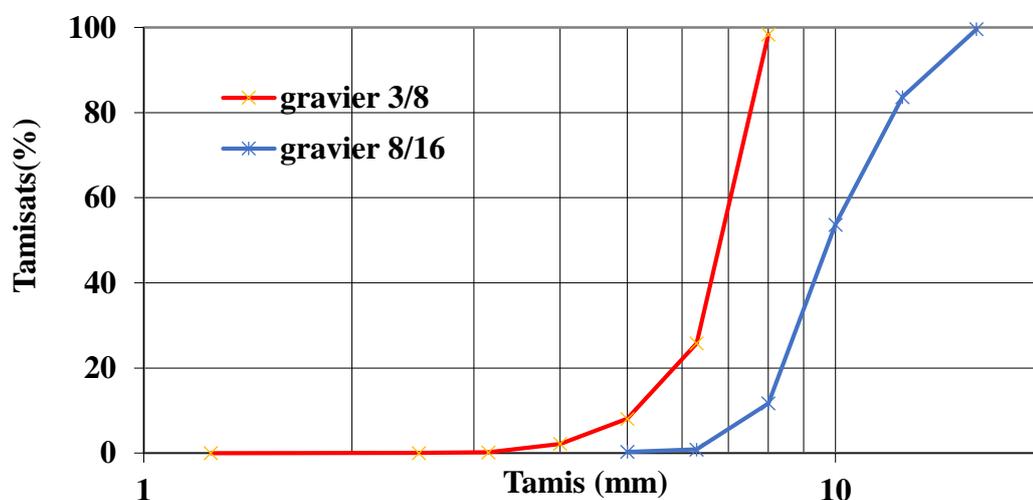
Les fractions des graviers utilisées sont la fraction **3/8** et la fraction **8/16**. Après le nettoyage avec l'eau et séchés l'étuve à 105 C°.

**III.3.2.1 Analyse granulométrique**

Les mêmes étapes d'essai que celui du sable sauf pour les diamètres des tamis. La masse prise Pour la fraction 3/8 est de 1.6 kg et celle de la fraction 8/16 est de 3.2 Kg

**Tableau III.4. L'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)		Refus cumulés (g)				Tamisât (%)	
	3/8	8/16	(g)		(%)		3/8	8/16
			3/8	8/16	3/8	8/16		
16	-	12	-	12	-	0.37	-	99.63
12.5	-	511	-	523	-	16.34	-	83.66
10	-	960	-	1483	-	46.34	-	53.66
8	26	1183	26	2666	1.63	83.31	98.38	11.69
6,3	1161	507	1187	3173	74.18	99.15	25.81	0.85
5	284	17	1471	3190	91.93	99.68	8.0625	0.32
4	94	-	1565	-	97.81	-	2.19	-
3,15	32	-	1597	-	99.81	-	0.19	-
2,5	2	-	1599	-	99.93	-	0.062	-
1.25	1	-	1600	-	100	-	00.00	-
Fond	4	7	1604	3197	100	99.90	00.00	0.10



**Figure III.2. Courbes granulométriques du gravier 8/16 et 3/8**

III.3.2.2. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés

- *Masses volumiques absolue et apparente [NF EN P18-554] et Compacité, porosité et l'indice de vide [NF EN P 18-554]*

Les résultats sont regroupés dans le **tableau 5.III**. Il est à noter que les valeurs mentionnées sont la moyenne de trois essais répétés.

**Tableau III.5. Les caractéristiques physiques du gravier utilisé**

Caractéristiques Physiques	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%) $P = (1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}) \times 100\%$	Compacité (%) $C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	Indice de vides E $E = \frac{P}{C}$
Valeurs moyenne du gravier 3/8	2.5	1.50	40	60	0.66
Valeurs moyenne du gravier 8/16	2.63	1.89	28.13	71.86	0.39

III.3.2.3 Les caractéristiques mécaniques du gravier

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection des bétons.

- *Essai Los Angeles [NF EN P18-573]*

$$LA = 100 \times \frac{5000 - 3587}{5000} = 28.26.$$

**Tableau III.6. Classification des roches en fonction du coefficient LA**

Coefficient LA	Nature de los Angeles LA
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
<50	Très tendre

Le gravier (8/16) est un gravier **assez dure** se trouve dans l'intervalle des graviers admissibles.

**iii.4. Ciment (CEM II/B 42,5)**

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe 42.5 provient de la cimenterie de Lafarge de M'sila.

**III.4.1 Caractérisation chimique et minéralogique du ciment utilisé (CEM II/B 42.5)**

**Tableau III.7. Les compositions chimique et minéralogique du CEM II/B 42.5**

Oxyde	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$Fe_2O_3$	Mgo	$So_3$	$Na_2O$
Teneur	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09
Elément	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF
Teneur (%)	59		14		6		100

**III.4.1.2. Caractéristiques physiques du ciment utilisé EN 196-1**

**Tableau III.8. Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5**

Les caractéristiques physiques		Unité	Valeur
Masse volumique absolue		$g/cm^3$	3,15
Consistance normale		%	26-28
La finesse (Blaine)		$cm^2/g$	4000-4200
Le Chatelier	A froid	Mm	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	Min	2 :30
	Fin		3.30
Résistance à la compression	2 jours	MPa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

**III.5. Les Fillers de calcaire**

Toutes les caractéristiques sont présentées ci-après :

**Tableau III.9. Les compositions chimiques et les propriétés physiques du calcaire**

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
CaO	57,60	Densité absolue	2.73	g/cm <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	Densité apparente	0.77	g/cm <sup>3</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	S.S.B	2000	cm <sup>2</sup> /g
SiO <sub>2</sub>	0,13	D <sub>10</sub>	1.1	µm
Mgo	0,13	D <sub>50</sub>	4.06	µm
Na <sub>2</sub> O	0,06	D <sub>90</sub>	28.67	µm
K <sub>2</sub> O	0.00	I <sub>28</sub>	0.74	/
CL <sup>-</sup>	0,002	I <sub>90</sub>	0.76	/
SO <sub>3</sub>	0,02			
P-A-F (1000°C)	41,98			

### III.6. Poudre de céramique

La poudre utilisée est destinée à la fabrication des matériaux de revêtements en céramique dite poudre atomisée (voir chapitre I). On l’a obtenue au niveau du SARL EL NOURASI-CORPORATION située à Oued Athmenia, Mila, Algérie. Cette poudre est un mélange, issue de différents gisements locaux : Annaba, Alger, BBA (Medjana) et Jijel (El-Milia).

Après avoir broyé cette poudre, on la fait passer à travers le tamis 0,08 mm pour assurer sa finesse, donc un SSB élevé et de densité absolue qui vaut **2,57**.

### III.7. Les adjuvants

Dans notre étude on a utilisé un super-plastifiant de type **MEDAFLOW 30** de Granitex.

#### III.7.1. Définition

Le « **MEDAFLOW 30** » est un super plastifiant haut réducteur d’eau de la troisième génération. Permet d’obtenir des bétons de très haute qualité et ne présente pas d’effet retardateur.

Les caractéristiques du MEDAFLOW 30 sont représentées dans le tableau suivant

**Tableau. III.10. Caractéristiques de l’adjuvant « MEDAFLOW 30 »**

Aspect	Couleur	PH à 20°C	Densité	Chlorure	Extrait sec
Liquide	Brun clair	6 - 6.5	1.07 ±0.01	< 0.1 g/l	30%

### *III.7.2. Dosage en super plastifiant*

Le dosage choisi est celui de saturation, déterminé à partir de l'essai au mini cône qui consiste à remplir le petit cône de pâte de liant, placé sur une plaque à surface propre et humidifiée. Le cône est ensuite soulevé et la pâte en sort en formant une galette qui s'élargit sous son propre poids. La valeur de l'étalement, après une minute, correspond au diamètre moyen de la galette de la pâte, le degré de saturation en superplastifiant est atteint lorsque le diamètre d'étalement reste constant **figure13. III.**

Pour cette étude la valeur est de 1,9 % de la masse du liant (ciment + calcaire).



*Figure. III.3. Détermination du point de saturation au mini cône*

### *III.8. L'eau de gâchage*

L'eau utilisée dans ce gâchage c'est une eau potable dans notre laboratoire génie civil de l'université de Bourdj Bou Arreridj.

### *III.9. Formulation de béton auto plaçant par la méthode AFGC*

Il est nécessaire de respecter les conditions recommandées par l'AFGC :

#### *III.9.1. Choix des constituants pour formuler notre BAP*

Notre étude s'appuie sur la variation du rapport G/S et l'incorporation de la poudre de céramique en substitution de la masse du ciment à différents pourcentages. Le reste des constituants est fixé.

#### **Les données :**

On a choisi un rapport  $G/S = 0.95$  et un autre rapport qui vaut  $0.85$ . Donc on aura ainsi deux formules de base à préparer avec :

Le dosage en ciment vaut  $400 \text{ Kg} / \text{m}^3$

### CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux utilisés

---

Le rapport eau/liant (E/L) = 0.38

Le dosage en superplastifiant SP est de 1.9% de la masse de liant.

Le dosage en Calcaire est de 10% de la masse de ciment en complément, soit 40 Kg/ m<sup>3</sup>. Cette valeur est maintenue constante pour tous les mélanges.

La masse du liant (ciment+calcaire) est de 440Kg/m<sup>3</sup>.

On fait remplacer par la suite à chaque fois le ciment par un pourcentage de poudre de céramique.

On a choisi trois valeurs de substitution : 2, 7 et 14% de la masse de ciment. On aura 6 mélanges supplémentaires à préparer.

#### III.9.3. Calcul des composantes des mélanges pour un mètre cube (1000 litres)

On prend, comme exemple de calcul détaillé, le rapport G/S = 0,95

$$\text{L'eau } E : \frac{E_{\text{eau}}}{L_{\text{liant}}} = \frac{E}{L} = 0,380 \text{ donc } E=L*0,380=440*0,380$$

On trouve E=167,2 kg

**Le super Plastifiant SP** :  $SP = 1,9\% \times L$  d'où  $SP = 1,9\% \times 440 = 8,36$  Kg

L'extrait sec vaut 30% du super plastifiant, alors 70% représente la quantité d'eau Esp.

$Esp = 70\% * 8,36 = 5,85$  kg qu'on doit retrancher de la quantité globale de l'eau.

Donc **la quantité d'Eau de gâchage est** :  $Eg = E - Esp = 167,2 - 5,85$ , on trouve **Eg = 161,35** ℓ

#### Détermination du volume des granulats $V_{\text{granulats}}$ :

Sachant que le volume total unitaire est :  $V_{\text{total}} = V_{\text{pâte}} + V_{\text{granulats}} + V_{\text{air}}$  ;

Avec :  $V_{\text{total}} = 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ ℓ}$  et le volume des vides représente 2,5% du volume total, donc  $V_{\text{air}} = 25 \text{ ℓ}$ .

Le Volume de pâte  $V_{\text{pâte}}$  est la somme de :

$$V_{\text{pâte}} = \frac{M_{\text{ciment}}}{\rho_c} + \frac{M_{\text{calcaire}}}{\rho_F} + \frac{ME_{\text{eau}}}{\rho_E} + \frac{MS_{\text{superPlastifiant}}}{\rho_{Sp}}$$

(M représente la masse et  $\rho$  la masse volumique absolue)

$$\text{On aura : } V_{\text{pâte}} = \frac{400}{3,1} + \frac{40}{2,73} + \frac{161,35}{1} + \frac{8,36}{1,07} = 312,845 \text{ ℓ}$$

Donc le volume des granulats sera :  $V_{\text{granulats}} = V_{\text{total}} - (V_{\text{pâte}} + V_{\text{air}})$

$$V_{\text{granulats}} = 1000 - (312,845 + 25) \text{ d'où } V_{\text{granulats}} = 662,155 \text{ ℓ}$$

Cette valeur représente la somme des volumes des graviers  $V_{\text{gr}}$  et sable  $V_{\text{s}}$

**Le dosage en masse du Sable** : on sait que  $\frac{G}{S} = 0,95$  et que  $V_{\text{granulats}} = V_{\text{s}} + V_{\text{gr}}$ , on aura :

$$V_{\text{gr}} = V_{\text{s}} + 0,95 \times V_{\text{s}} \rightarrow V_{\text{s}} = \frac{662,155}{1,95} = 339,566 \text{ ℓ, c'est le volume de Sable avec } \rho_s = 2,6 \text{ Kg/ ℓ}$$

ainsi sa masse est : **Msable = 882,87Kg**

### CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux utilisés

**Le dosage en masse des graviers :** on a le volume des graviers  $V_{gr}$  égal à  $0,95 \times V_s$  alors

$$V_{gr} = 322,58 \text{ l}$$

- $V_{gr} (3/8) = V_g \times 40\% = 322,58 \times 40\%$  qui vaut  $129,03 \text{ l}$ , avec  $\rho_s = 2,5 \text{ Kg/l}$  alors  
**M=322,57 Kg ;**
- $V_{gr} (8/16) = 322,58 \times 60\% = 322,58 \times 60\%$  qui vaut  $193,55 \text{ l}$  avec  $\rho_s = 2,63 \text{ Kg/m}^3$  alors  
**M=509,03 Kg.**

Les dosages exprimés en masses sont récapitulés dans le tableau III.11.

De la même méthodologie de calcul, on détermine pour le rapport  $G/S=0,85$  et pour les autres mélanges pour un mètre cube de béton et par la suite faire l'équivalent pour  $46 \text{ l}$  de béton, quantité nécessaire pour la confection des éprouvettes.

#### Clarification :

Les symboles  $BAP_{i,j}$  présentés dans les tableaux III.11. Et III.12

Pour  $i=1$ , c'est un BAP avec le rapport  $G/S=0,95$ .

Pour  $i=2$ , c'est un BAP avec le rapport  $G/S=0,85$ .

Les  $j$  représentent les pourcentages de céramique (2%, 7% et 14%)

**Tableau III.11. Formulation des BAP de rapport  $G/S=0,95$  par la méthode AFGC**

Constituants	Quantité des $BAP_{i,j}$ en Kg							
	BAP <sub>1-0</sub>		BAP <sub>1-2</sub>		BAP <sub>1-7</sub>		BAP <sub>1-14</sub>	
	0% céramique		2% céramique		7% céramique		14% céramique	
	1 m <sup>3</sup>	46 l	1 m <sup>3</sup>	46 l	1 m <sup>3</sup>	46 l	1 m <sup>3</sup>	46 l
Ciment	400	18,4	392	18,03	372	18,03	344	15,82
Gravier 3/8	322,57	14,83	322,57	14,83	322,57	14,83	322,57	14,83
Gravier 8/16	509,03	23,41	509,03	23,41	509,03	23,41	509,03	23,41
Sable	882,87	40,61	882,87	40,61	882,87	40,61	882,87	40,61
Eau	161,34	7,42	161,35	7,42	161,35	7,42	161,3	7,42
Super plastifiant	8,36	0,384	8,36	0,384	8,36	0,384	8,36	0,384
filler de calcaire	40	1,84	40	1,84	40	1,84	40	1,84
Céramique	0	0	8	0,368	28	1,288	56	2,576

**Tableau III.12. Formulation des BAP de rapport G/S=0.85 par la méthode AFGC**

Constituants	Quantité des BAP <sub>i,j</sub> en Kg							
	BAP <sub>2-0</sub> 0% céramique		BAP <sub>2-2</sub> 2% céramique		BAP <sub>2-7</sub> 7% céramique		BAP <sub>2-14</sub> 14% céramique	
	1 m <sup>3</sup>	46 ℓ	1 m <sup>3</sup>	46 ℓ	1 m <sup>3</sup>	46 ℓ	1 m <sup>3</sup>	46 ℓ
Ciment	400	18.4	392	18.03	372	17.11	344	15.83
Gravier 3/8	304 .25	13.99	304 .25	13.99	304 .25	13.99	304 .25	13.99
Gravier 8/16	480.08	22 .08	480.08	22 .08	480.08	22 .08	480.08	22 .08
Sable	930.59	42.80	930.59	42.80	930.59	42.80	930.59	42.80
Eau	161.34	7.42	161.34	7.42	161.34	7.42	161.34	7.42
Super plastifiant	8.36	0.384	8.36	0.384	8.36	0.384	8.36	0.384
filler de calcaire	40	1.84	40	1.84	40	1.84	40	1.84
Céramique	0	0	8	0.368	28	1.288	56	2.57

### III.10. Procédures de fabrication des BAPs

Nous avons préparé ce BAP dans laboratoire de génie civil à l'université Mohamed el Bachir el Ibrahim et les tests sont effectués au même laboratoire La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire pour réaliser ce béton on suit le mode opératoire suivant

- Préparé les matériaux sèche (gravier, sable, ciment, filler de calcaire et la poudre de céramique). Mettez ces matériaux dans le malaxeur et mélangez-les pendant 1,30min.
- Après avoir préparé la quantité d'eau et superplastifiant nécessaire en ajoutes attentivement et continue à malaxer pendant 3 minutes.

Alors la durée du malaxage est 4 min et 30 secs.

- Après l'arrêt de malaxage faire les essais immédiatement (l'étalement, l'écoulement, stabilité au tamis et le rhéomètre).
- Graissés les moules à l'aide d'huile pour faciliter le décoffrage. En remplir les éprouvettes par trois couches sans vibration, à chaque fois on fait mélanger le béton pour éviter la ségrégation et le ressuage.

### III.11. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais

#### III.11.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams : [NFEN12 350-8]

L'essai de l'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque. L'essai consiste à remplir le cône en une fois, puis soulever et de mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement. Plus le diamètre est grand, plus le BAP est fluide. L'essai est présenté dans la figure suivante :



Figure. III.4. L'essai d'étalement (laboratoire de génie civil).

#### III.11.2. L'essai de la boîte en L : [NF EN 12 350-10]

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

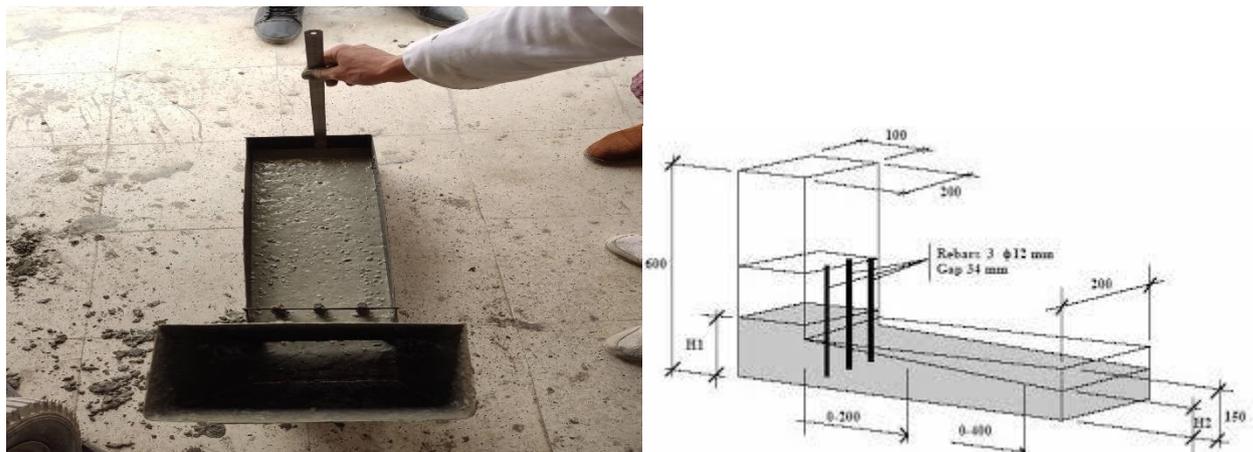


Figure III.5. L'essai de la boîte en L (laboratoire de GC).

### ***III.11.3 Stabilité au tamis : [NF EN 12 350-11]***

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation statique et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité.



***Figure III.6. L'essai stabilité au tamis (laboratoire GC).***

### ***III.11.4 Essai rhéomètre***

Le rhéomètre est un appareil conçu spécialement pour mesurer les propriétés rhéologiques des fluides, Il permet une caractérisation plus complète en termes de viscosité, de plasticité (seuil d'écoulement) et d'élasticité.



***Figure. III.7. Essai rhéomètre (laboratoire GC).***

## ***III.12. Confection des éprouvettes***

### ***III.12.1. Type et taille des moules***

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme :

- Moule prismatique (7×7×28).

- Cubique (10x10x10 cm).
- Cylindrique (16x32cm).

### III.12.2. Conservation des éprouvettes

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24h après le coulage puis conservées sous l'eau à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .



*Figure III.8. Bague de conservation des éprouvettes (laboratoire GC)*

### III.13. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci

#### III.13.1. Les essais destructifs

##### 1- La résistance à la compression

La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. On classe le béton en fonction de sa résistance mécanique en compression mesurée à 7, 14 et 28 jours. Elle est exprimée en **MPa**.



*Figure III.9. L'essai de compression (au laboratoire GC)*

### 2- La résistance à la traction par flexion

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton, c'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prisme (7x7x28) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.



Figure III.10. L'essai de la résistance à la traction par flexion (laboratoire GC)

### III.13.2. Les essais non destructifs

#### 1- Ultrason [NA EN 12504-4]

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation de l'onde sonore traversant le béton. Après avoir calculé la vitesse, plus la vitesse est grande, plus le béton est résistant.



Figure III.11. L'essai d'ultrason (laboratoire GC)

#### 2- Essai de scléromètre [NA EN 12504-2]

Le scléromètre est un appareil qui mesure la "dureté au choc" du béton à la surface (Indice sclérométrique).



*Figure III.12. L'essai de scléromètre (laboratoire GC)*

### ***III.14. Conclusion***

Dans ce chapitre on a présenté les différents essais et caractéristiques des matériaux utilisés (gravier, sable, ciment, filler de calcaire, poudre de céramique et le superplastifiant). Pour la préparation du béton autoplaçant avec une formulation de deux rapport ( $G/S=0.95$ ) et ( $G/S=0.85$ ) à base de poudre de céramique (2%, 7% et 14%).

Nous avons effectué les essais aux laboratoires de génie civil à l'université de Mohamad EL Bachir El Ibrahimy. Et on a fait tous les expériences pour ce béton soit à l'état frais ou durci.

# **CHAPITRE IV : Analyse et modélisation des résultats**

## Chapitre IV

### Analyse et modélisation des résultats

#### *Partie 01 : Résultats et interprétations.*

##### *IV.1. Introduction*

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent les propriétés mécaniques des bétons autoplaçants étudiés, en combinant les résultats de huit mélanges.

En effet, et à partir des mélanges obtenus, on doit procéder aux différents essais afin de caractériser les BAPs confectionnés. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC.

Nos mélanges sont identifiés comme suit : **BAP**<sub>i-j</sub>

Avec :

i= 1 pour un rapport G/S= 0.95 et i=2 pour un rapport G/S=0.85 ;

j= 2 ou 7 ou 14 selon le pourcentage d'addition de la poudre de céramique.

##### IV.2. Résultats des essais à l'état frais

Les principales caractéristiques se développent à l'état frais et peuvent être décrites en termes de fluidité, de viscosité, de risque de blocage et de ségrégation.

###### IV.2.1 Résultats des essais de caractérisation des BAPs

Le comportement du béton à l'état frais a des conséquences pratiques sur son comportement dans les structures à l'état durci. Il est donc nécessaire de contrôler les caractéristiques de ces bétons vis-à-vis de l'écoulement autoplaçant à l'état frais qui constitue une première condition pour garantir une application correcte de ce matériau.

La caractérisation à l'état frais des bétons de notre étude, s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC : étalement au cône, écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis

Le tableau IV.1 récapitule tous les résultats trouvés des essais à l'état frais et qui seront par la suite illustrés par des histogrammes comme le montrent les figures IV.1 à IV.4.

Tableau IV.1 Résultats des essais à l'état frais

Type de BAP	L'étalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	L'écoulement %	Masses volumiques de béton (kg/l)
BAP 1-0	67.5	3.12	94	2.292
BAP1-2	68	2.17	94	2.275
BAP1-7	68	1.78	94.11	2.336
BAP 1-14	65	2.05	81	2.199
BAP2-0	68	3.33	94.11	2.268
BAP 2-2	65	5.07	83.33	2.257
BAP 2-7	66.5	2.74	88.23	2.266
BAP 2-14	68	3.16	89	2.215

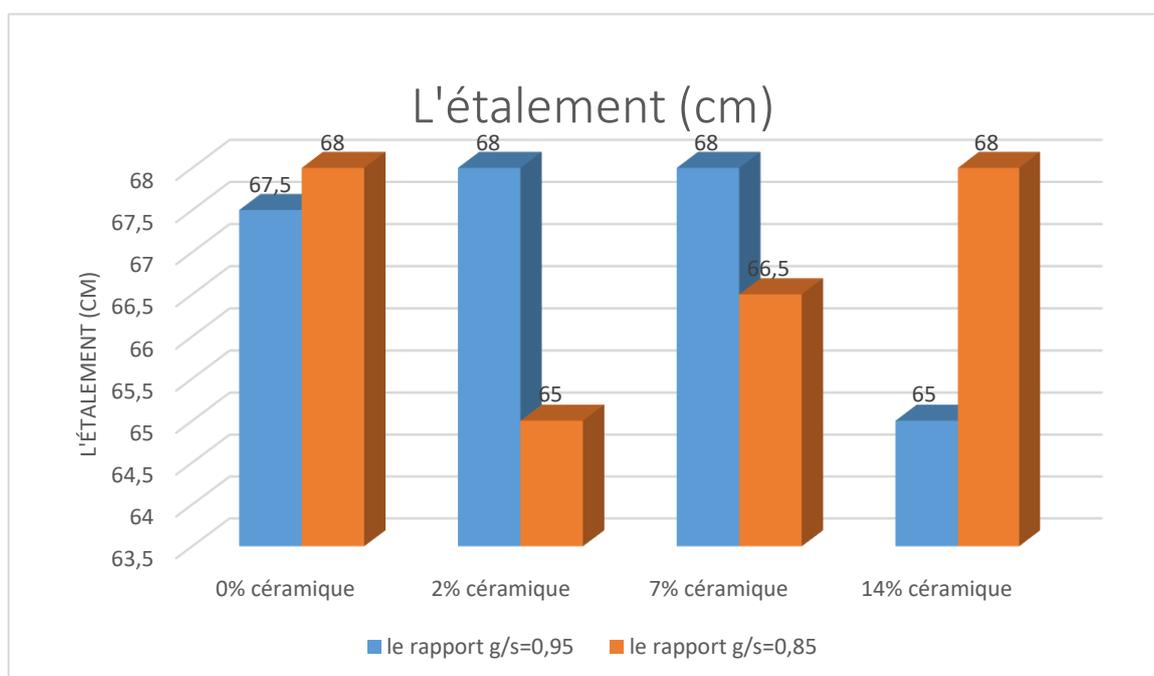


Figure.IV.1. Résultats de l'essai de l'étalement

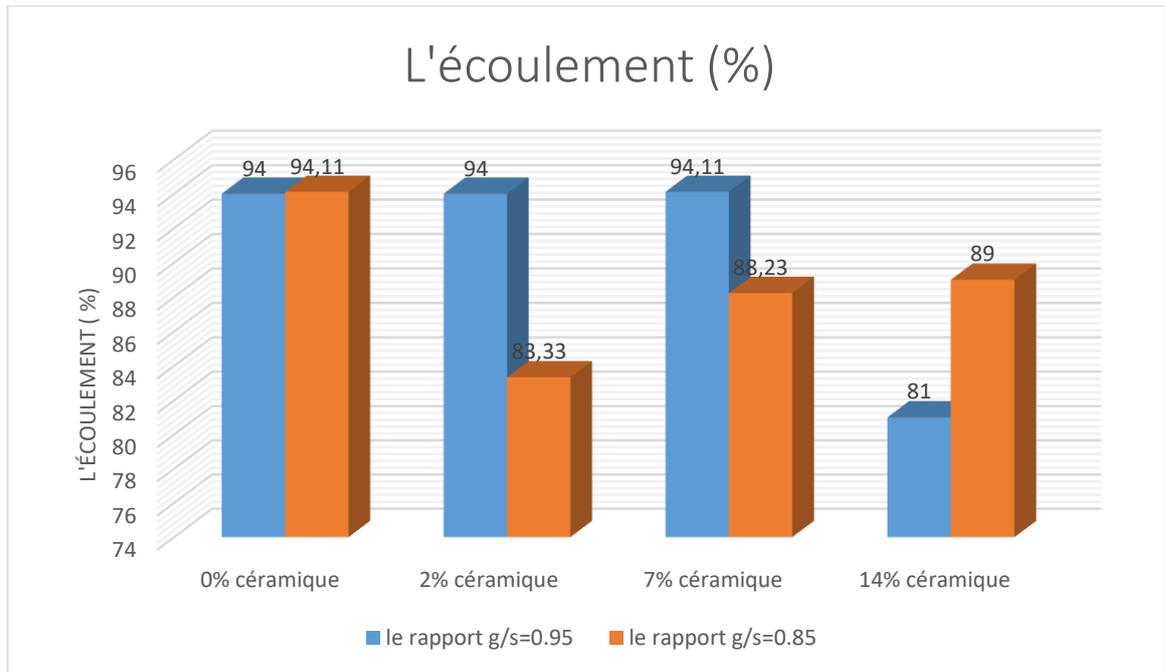


Figure IV.2. Résultats de l'essai de l'écoulement

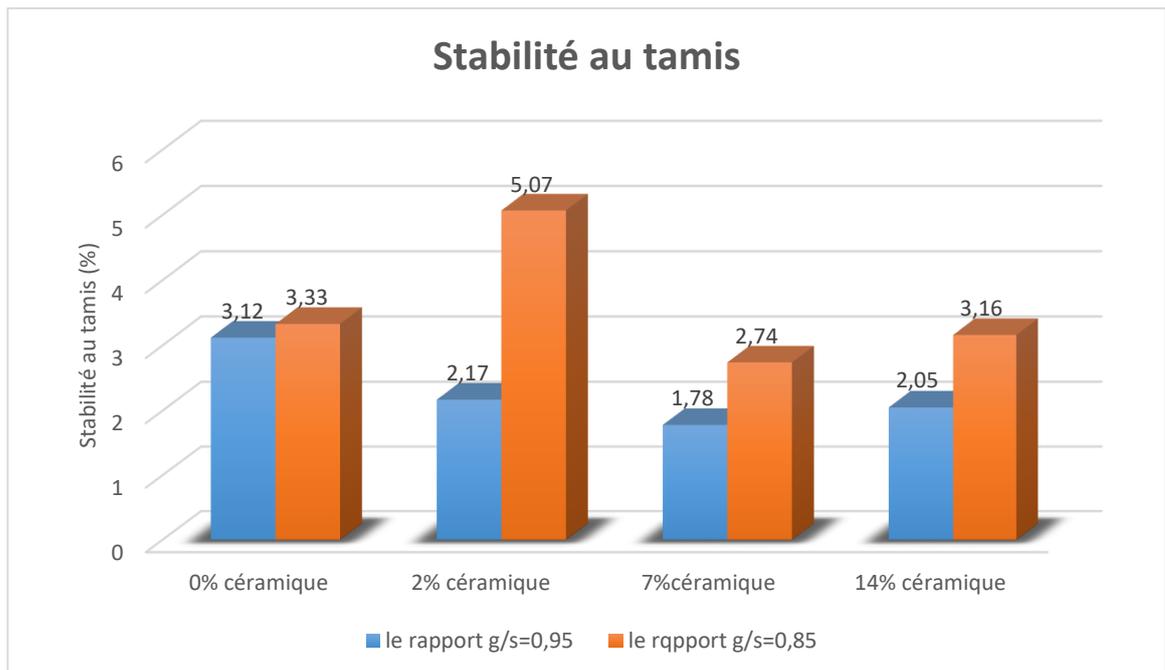
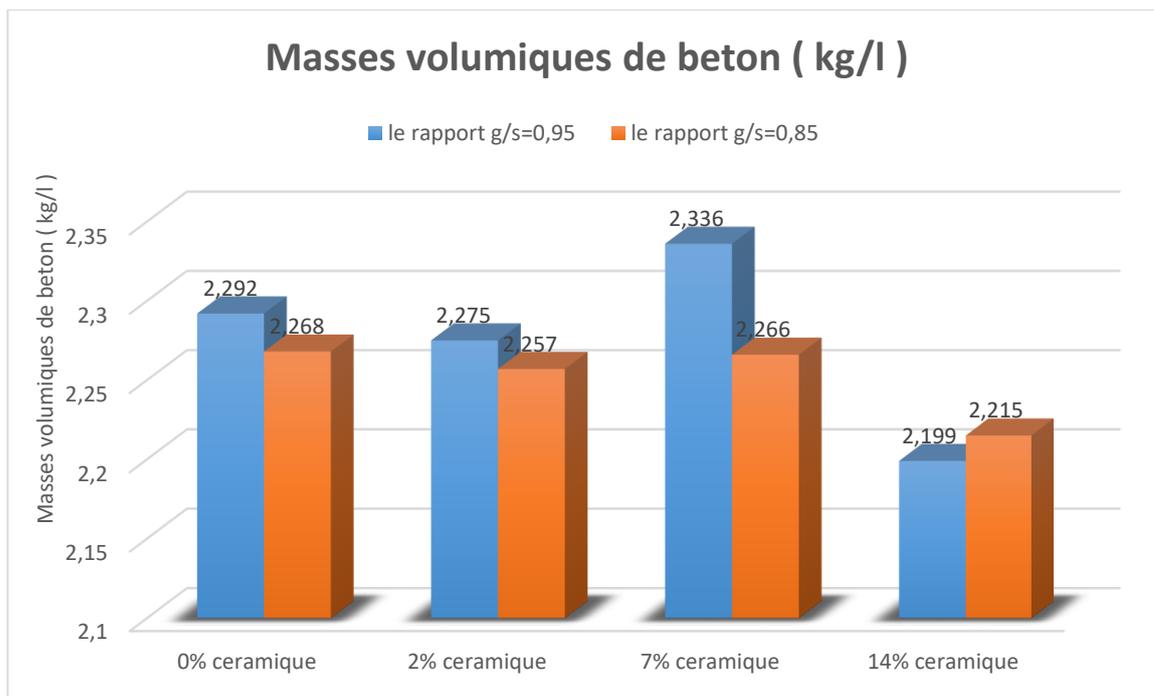


Figure IV.3. Résultats de l'essai de Stabilité au tamis



**Figure IV.4.** Les variations de la masse volumique des différents BAP formulés.

**Commentaires :**

Les compositions des bétons autoplaçant donnent une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage, qui constituent d'ailleurs ses spécificités, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou pratiquement très faible (de 1 à 2 mm). De plus les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

Nous pouvons constater que l'ensemble des BAP testés, respecte le critère d'étalement. Les valeurs spécifiées sont comprises entre 65 et 68 cm (tab.IV.1) et (fig.IV.1) qui sont associées aux mélanges BAP<sub>1-14</sub> et BAP<sub>1-2</sub>.

Les résultats d'essai pour la boîte en L présentés dans le tableau IV.1 et la figure IV.2 montrent clairement que les bétons présentent des rapports satisfaisant compris entre 81 à 94 (toutes les valeurs sont supérieures à 80%). La figure IV.3 montre aussi que tous les BAP ont un taux de ségrégation (laitance) inférieur à 15 % ce qui exprime une bonne stabilité, la figure IV.3 schématise clairement l'influence du rapport G/S, nous constatons que plus ce dernier augmente plus le taux de laitance diminue. A chaque fois que le pourcentage de PC augmente, on note que la masse volumique des BAP dans le rapport G/S=0.95 diminue (2.292 Kg/l à 2.199 Kg/l), même le rapport G/S=0.85 la masse volumique diminue (2.268 Kg/l à 2.215 Kg/l).

**IV.2.2 Comportement rhéologique des BAPs**

La caractérisation de l'ouvrabilité du béton nécessite la mesure de deux grandeurs : son seuil de cisaillement  $\tau_0$  et sa viscosité  $\mu$ . En effet, pour mettre en œuvre le béton facilement (béton pompable, facilité d'insertion de la cage d'armatures), son seuil de cisaillement doit être faible et sa viscosité modérée. Par ailleurs, pour assurer une certaine robustesse à la formulation (résistance à la ségrégation), la viscosité du béton doit être modérée. Pour quantifier ces paramètres, un rhéomètre rotatif type ICAR a été utilisé dans cette étude. Ce rhéomètre est piloté à l'aide d'un logiciel.

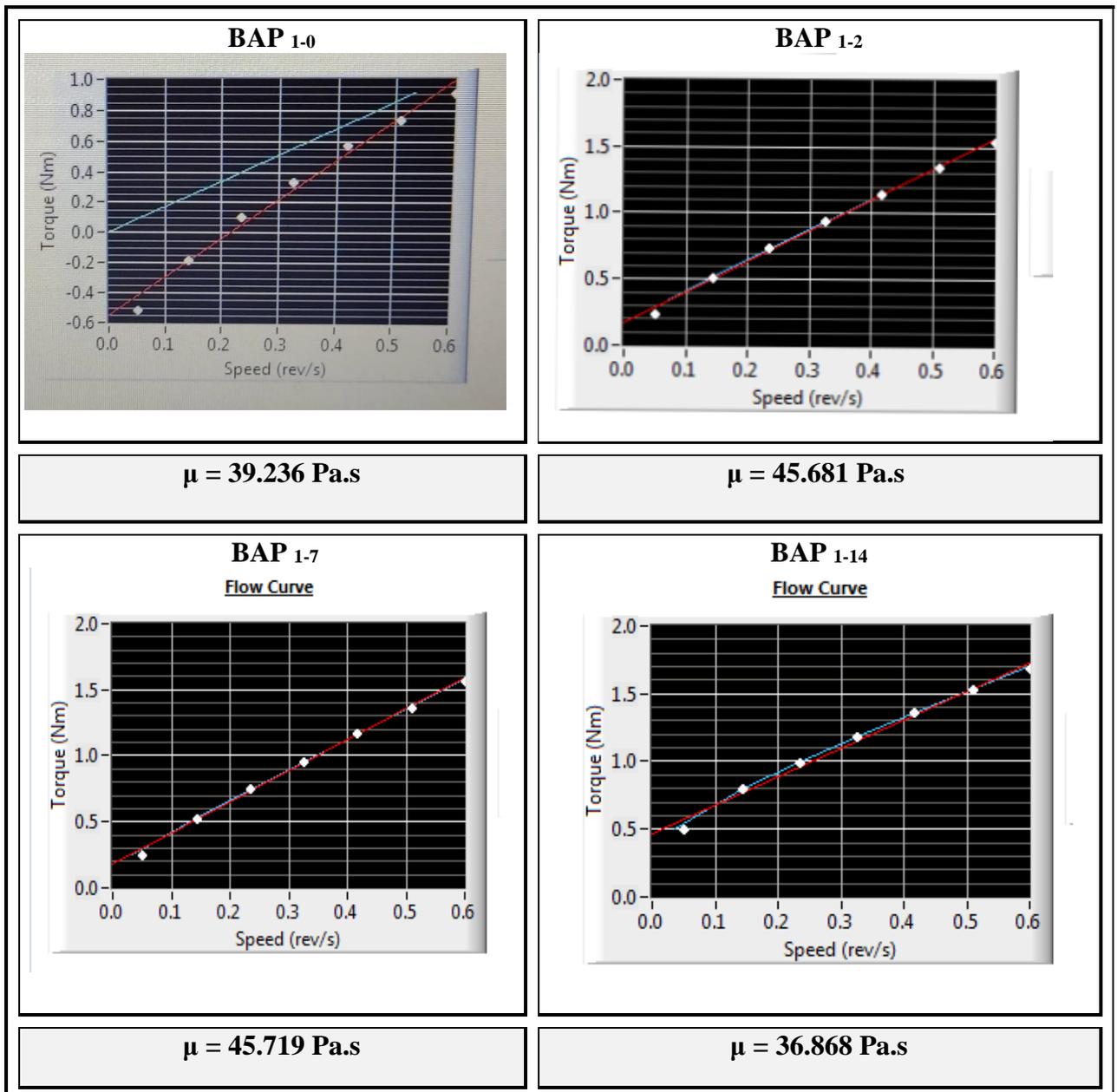


Figure IV.5. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour G/S=0,95.

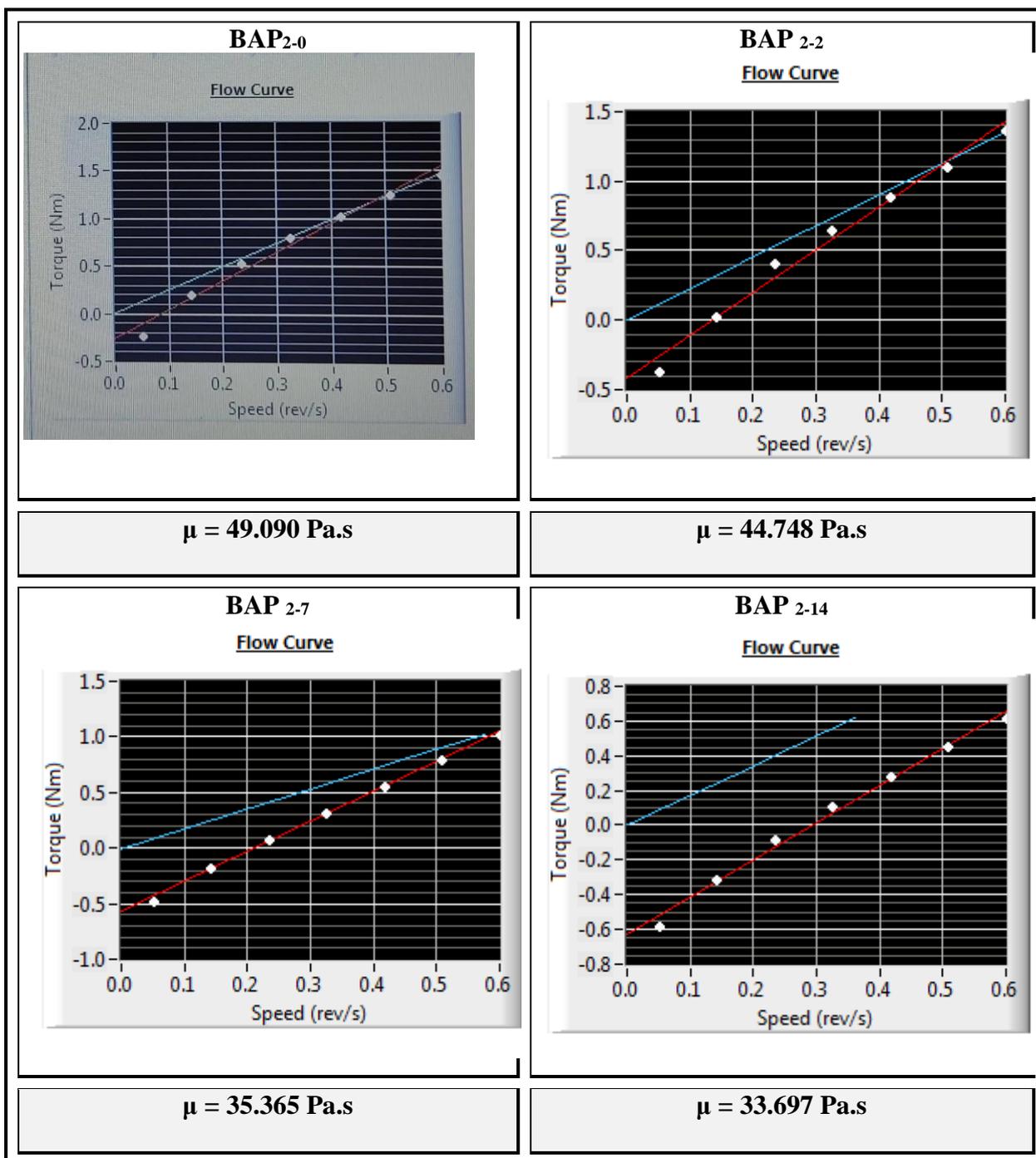


Figure IV.6. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour le rapport  $G/S=0.85$ .

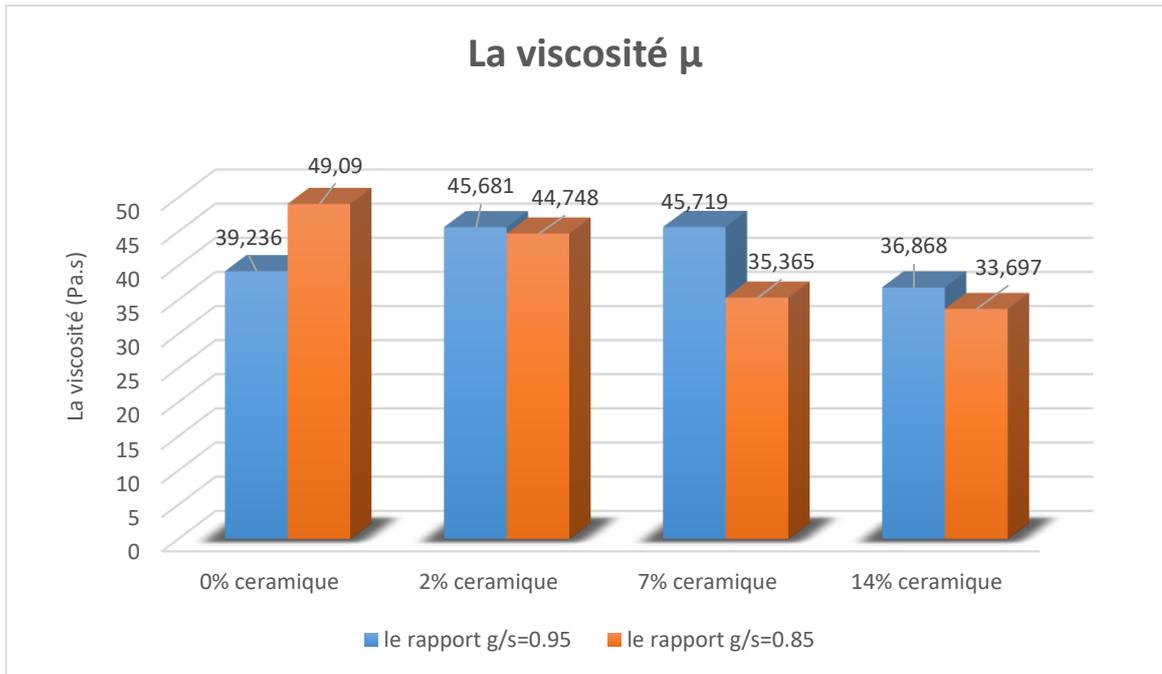


Figure IV.7. Les variations de la viscosité des différents BAP formulés

**Commentaires :**

Les tableaux et les figures ci-dessus présentent le comportement rhéologique d'un BAP avec les différents pourcentages de la poudre de céramique.

Les valeurs de viscosité varient entre 33.697 Pa.s pour le mélange BAP<sub>2-14</sub> et 49.090 Pa.s pour le BAP<sub>2-0</sub>

On peut conclure que les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir une viscosité aussi bonne. La nature de la poudre de céramique et sa granulométrie ainsi la finesse des ciments a un effet sur la viscosité du béton auto plaçant.

Le BAP doit avoir un seuil d'écoulement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement.

Les valeurs de cet essai respectent les recommandations d'AFGC.

**IV.3. Résultats des essais à l'état durci**

**IV.3.1. Les essais destructifs**

**IV.3.1.1. La résistance à la compression**

Le tableau IV.2 présente les valeurs moyennes de la résistance à la compression, à différents âges pour les huit bétons.

Tableau IV.2. La résistance à la compression des BAP.

Type de BAP	La résistance à la compression du BAP (MPa)					
	7J		14J		28J	
BAP <sub>1-0</sub>	44.483	46.23	47.585	46.307	55.054	50.821
	47.234		48.327		47.418	
	46.980		43.010		49.992	
BAP <sub>1-2</sub>	36.427	36.278	41.139	41.517	41.791	43.728
	36.097		41.848		43.050	
	36.310		41.566		46.345	
BAP <sub>1-7</sub>	43.727	44.524	40.465	41.141	49.537	46.310
	44.016		43.891		44.054	
	45.829		39.068		45.341	
BAP <sub>1-14</sub>	32.328	31.738	30.387	30.411	33.572	35.005
	29.944		31.240		35.041	
	32.944		29.606		36.404	
BAP <sub>2-0</sub>	36.482	37.397	42.508	44.793	47.109	49.078
	37.486		46.766		47.521	
	38.223		45.109		52.665	
BAP <sub>2-2</sub>	39.978	39.97	36.337	41.590	55.013	54.123
	41.717		42.652		53.444	
	38.215		45.782		53.912	
BAP <sub>2-7</sub>	35.347	35.693	39.591	40.455	46.531	47.569
	35.264		39.735		48.622	
	36.468		42.040		47.556	
BAP <sub>2-14</sub>	30.213	31.112	38.945	35.839	36.76	37.87
	31.672		37.121		35.34	
	31.452		31.452		41.51	

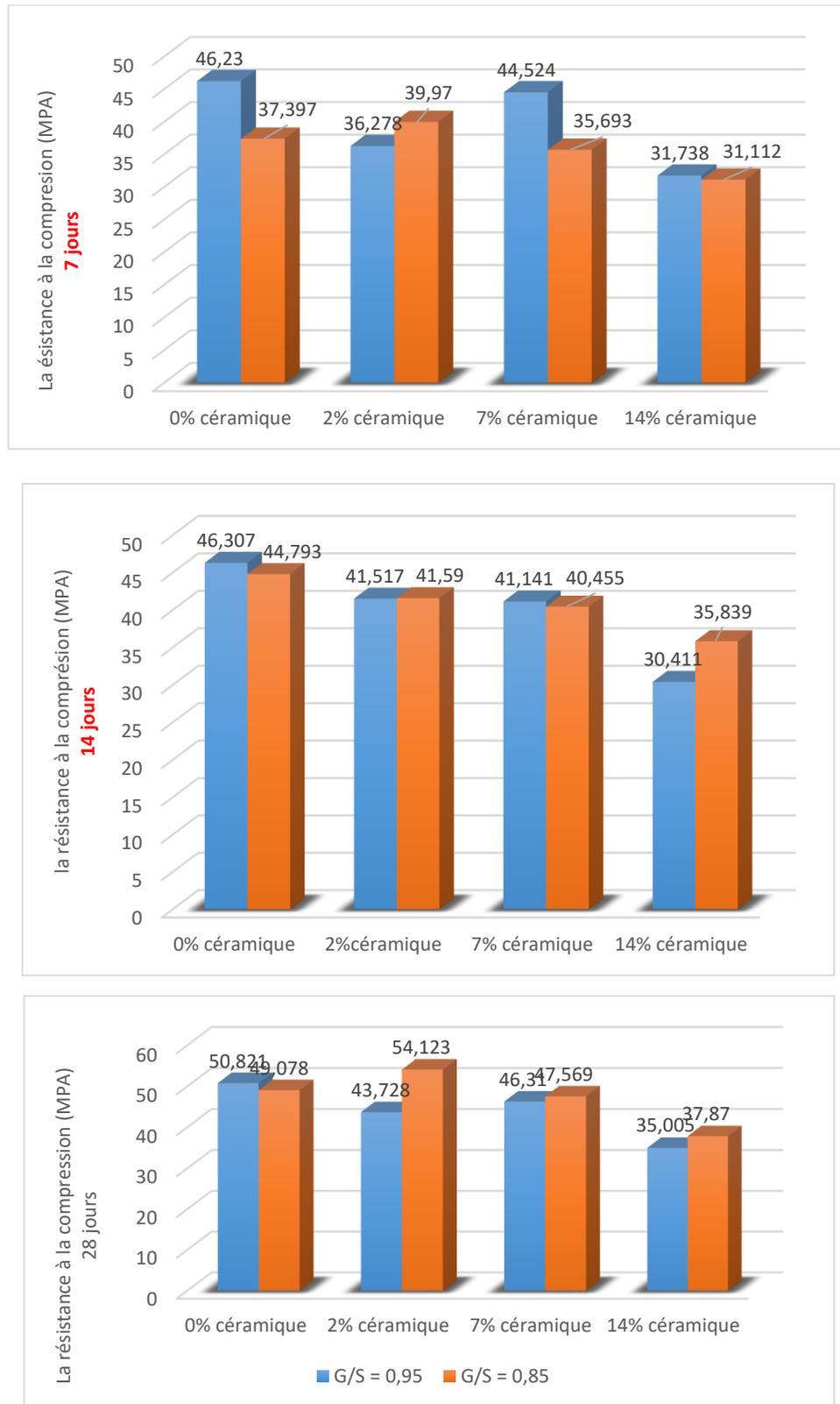


Figure IV.8. Résistance à la compression des BAPs à 7, 14 et 28 jours.

**Commentaire :**

- On peut noter que les résistances à la compression ne sont pas très différentes et sont comprises entre 43 et 50 Mpa à l'exception des Bap à base de 14% de céramique où on marque une chute remarquable de la résistance.
- La résistance à jeune âge pour le rapport G/S=0,95 est un peu élevée à celle de G/S=0,85  
Mais ce n'est pas le cas à 28 jours où c'était l'inverse.
- Le BAP 2-2 a donné le meilleur résultat.

**IV.3.1. 2. La résistance à la traction par flexion**

Les valeurs sont la moyenne de trois essais.

**Tableau.IV.3. Résultats de la Résistance à la flexion.**

Type de BAP	Résistance à la flexion (MPa)		
	7J	14J	28J
BAP 1-0	5.542	5.823	5.223
BAP 1-2	5.138	6.416	5.690
BAP 1-7	5.008	6.027	5.859
BAP 1-14	3.988	5.184	4.742
BAP 2-0	5.066	5.817	5.773
BAP 2-2	7.06	5.794	4.671
BAP 2-7	5.601	5.706	5.519
BAP 2-14	4.415	4.370	5.12

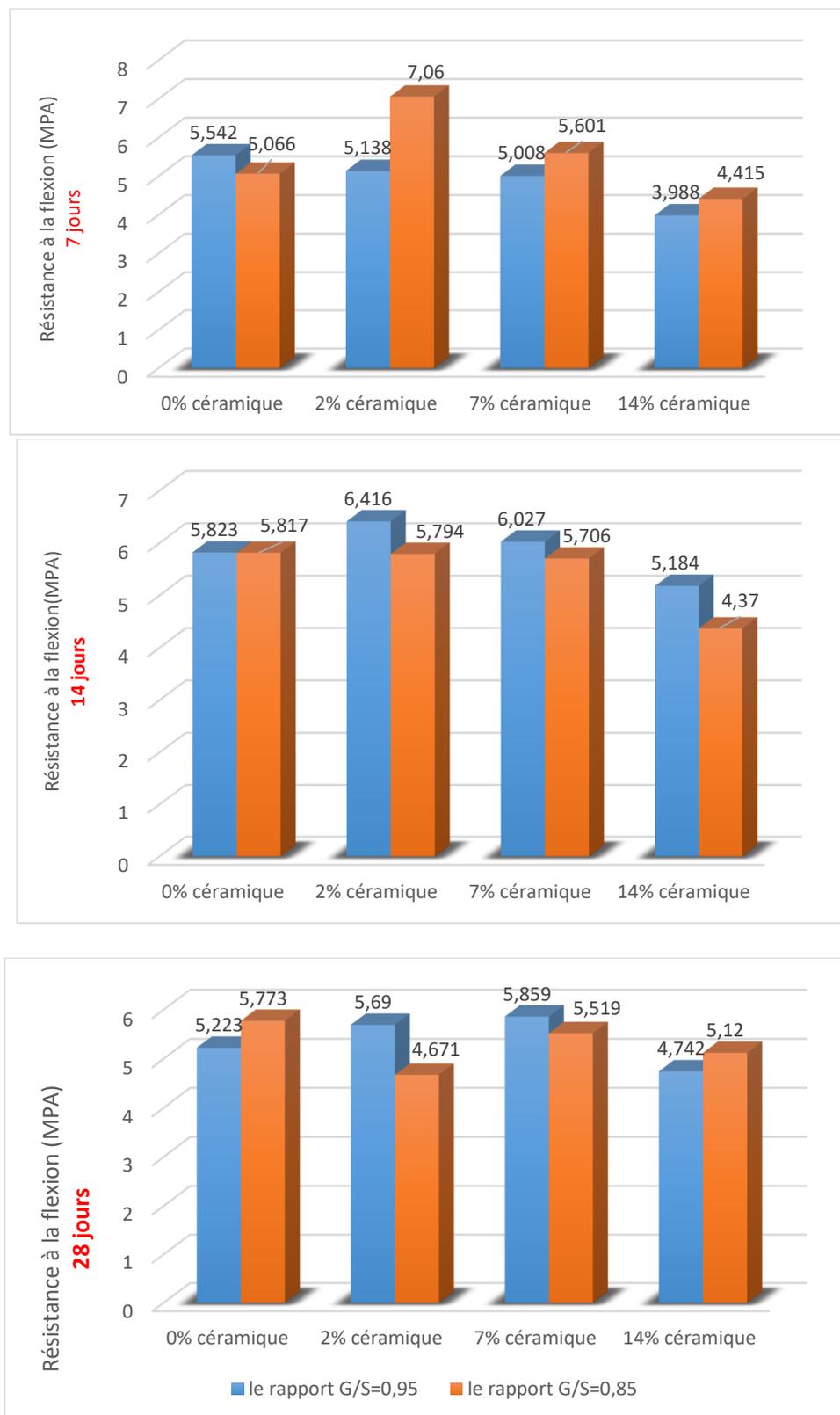


Figure. IV.9. Histogrammes des résistances à la flexion pour les différents âges de BAP

**Commentaire :**

Il est remarquable que nos BAPs résistent mieux à la traction à jeune âge où on marque des valeurs proches.

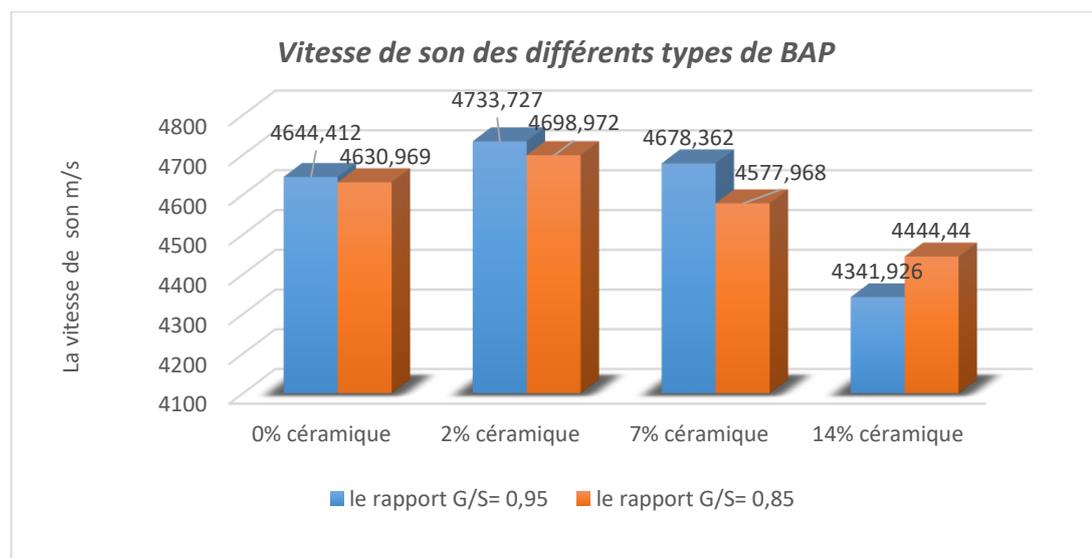
**IV.3.2. Les essais non destructifs**

On a effectué des essais d’auscultation dynamique pour déterminer la vitesse de propagation des ultrasons ainsi que l’essai au scléromètre pour déterminer la résistance à partir de l’indice sclérométrique  $I_s$ , et ce sur des éprouvettes cylindriques à 28 jours d’immersion.

Le tableau ci-après récapitule les résultats trouvés qui seront représentés par des histogrammes.

**Tableau IV.4. la vitesse de propagation des ultras son et scléromètre pour les BAP à 28 jours.**

Type de BAP	Vitesse de propagation (m/s)	Résistance par scléromètre $R_s$ (MPa)
BAP <sub>1-0</sub>	<b>4644.412</b>	<b>41</b>
BAP <sub>1-2</sub>	<b>4733.727</b>	<b>39</b>
BAP <sub>1-7</sub>	<b>4678.362</b>	<b>37.5</b>
BAP <sub>1-14</sub>	<b>4341.926</b>	<b>38</b>
BAP <sub>2-0</sub>	<b>4630.969</b>	<b>43</b>
BAP <sub>2-2</sub>	<b>4698.972</b>	<b>39</b>
BAP <sub>2-7</sub>	<b>4577.968</b>	<b>36.5</b>
BAP <sub>2-14</sub>	<b>4444.44</b>	<b>33</b>



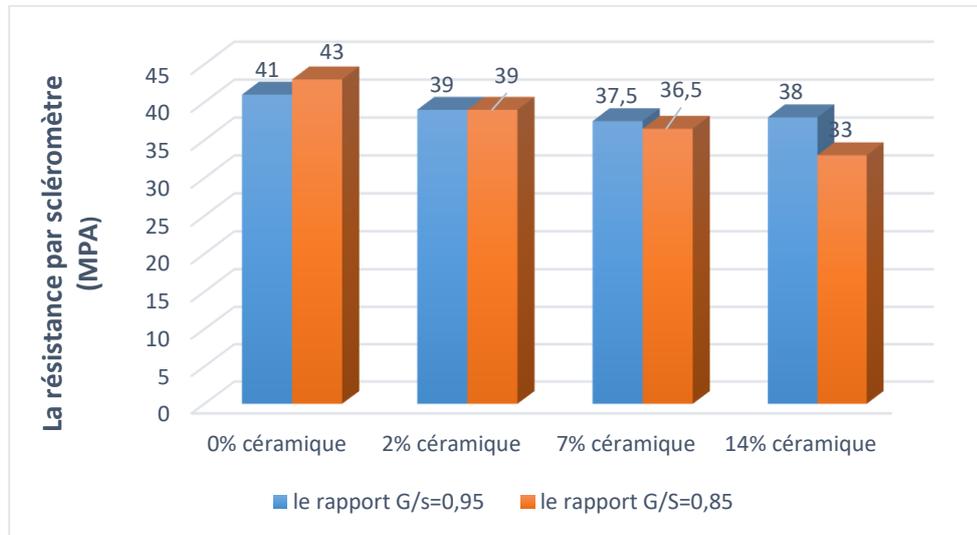
**Figure IV.10. Vitesse du son des différents types de béton.**

**Commentaire :**

Selon les résultats obtenues dans le tableau IV.4 et la figure IV.10, on constate que la vitesse de propagation du son de tous les types de béton est supérieure à 4200 m/s donc ces bétons sont à très haute résistance.

Ces résultats peuvent être justifiés par les vides (la masse volumique) et homogénéité des granulats et du bon étalement ainsi que l’écoulement et la bonne résistance à la ségrégation dans

les bétons et par l'influence des fins. Notant que l'augmentation de la vitesse de son est liée à la diminution des vides internes pour obtenir un bon résultat.



*Figure IV.11. Histogrammes des résistances au scléromètre.*

L'utilisation de la vitesse d'ultrason ou du scléromètre comme seule mesure ne permet pas d'évaluer précisément la résistance des bétons.

Une combinaison entre ces deux essais permet de réduire l'incertitude sur l'évaluation de la résistance mécanique.

## ***PARTIE 02 : MODELISATION ET ANALYSE DES RESULTATS***

### ***IV.4. Modélisation et Analyse des résultats à l'état frais***

Dans cette partie, on va traiter mathématiquement nos résultats, déjà interprétés vis-à-vis à la performance des BAPs à l'état frais et durci dans la partie 01 de ce chapitre, à partir des plans d'expériences où une expression de prévision sera proposée ainsi que deux graphiques, un concernant les valeurs observées en fonction des valeurs prévues et l'autre concernant le curseur de la grille de réponse.

#### ***IV.4.1. Les essais de caractérisation à l'état frais***

- 1. L'étalement (ET), Stabilité au tamis (ST), l'écoulement (L) et la viscosité ( $\mu$ ).**

a. Les expressions de la prévision

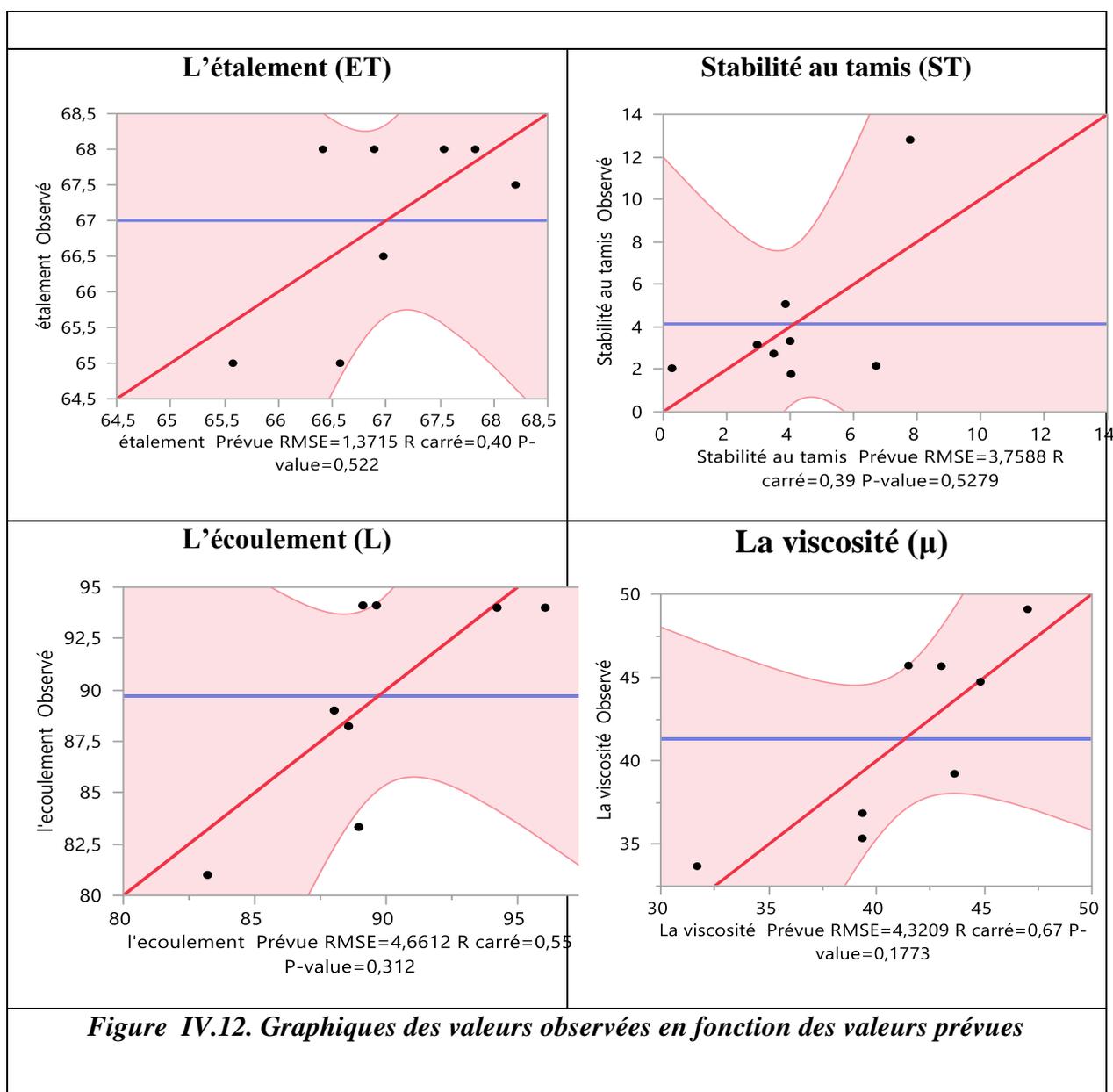
L'étalement (ET) :  $ET = 2.35546*PC + 17.89079228*G/S - 0.67665*PC*G/S + 51.20609$

Stabilité au tamis (ST) :  $ST = 3.85252*PC + 37.81327*G/S - 4.61970*PC*G/S - 28.1395$

L'écoulement (L) :  $L = 7.05929*PC + 69.38029*G/S - 4.61970*PC*G/S + 30.14156$

Viscosité ( $\mu$ ) :  $\mu = -7.81256*PC + 7.90277*PC*G/S - 33.931*G/S + 75.8638$

b. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



c. Curseur de la grille de réponse

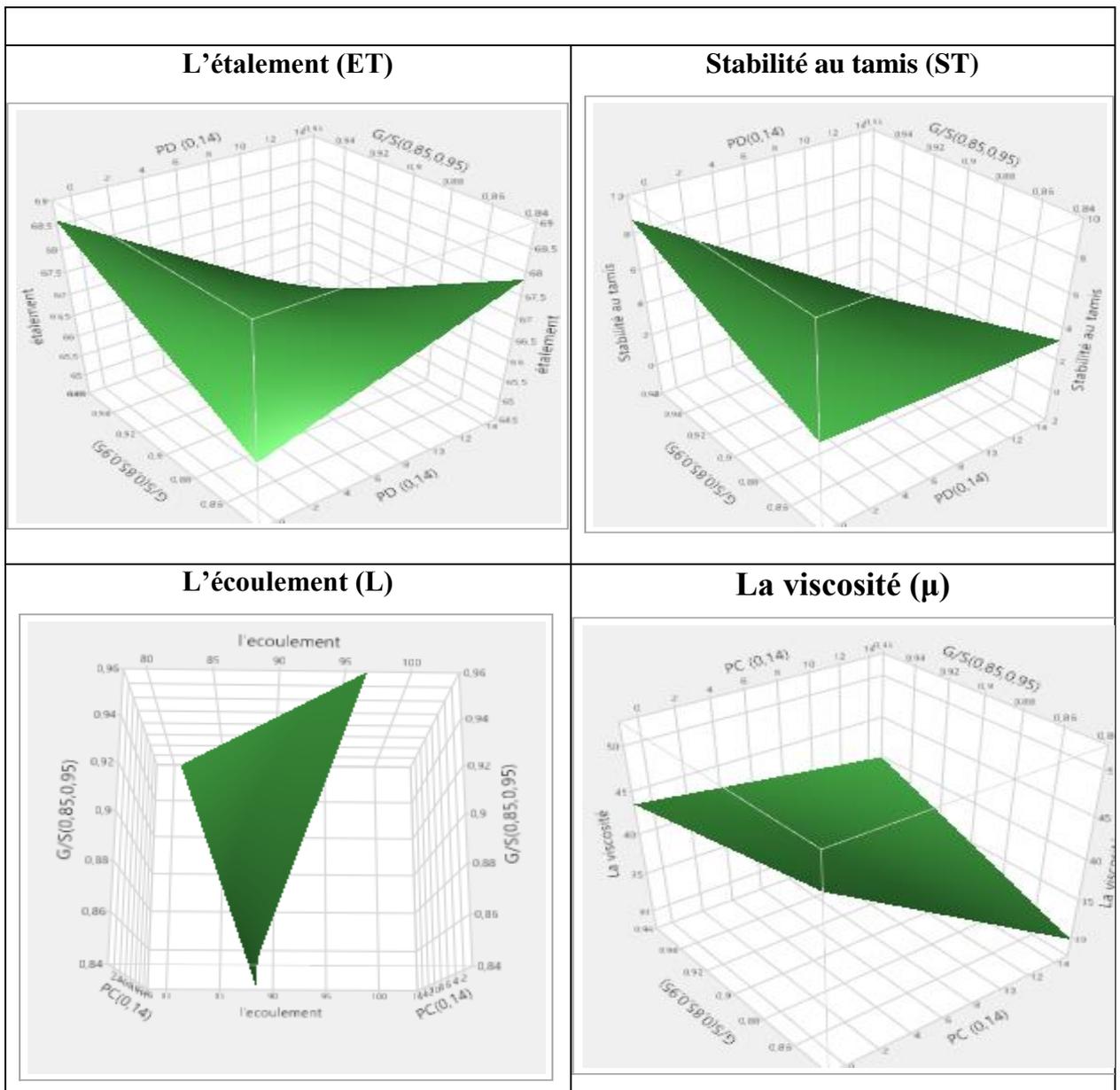


Figure IV.13. Curseur de la grille de réponse des essais à l'état frais

IV.5. Modélisation et Analyse des résultats à l'état durci

IV.5.1. Résultats de la résistance à la compression Rc à 7, 14 et 28 jours

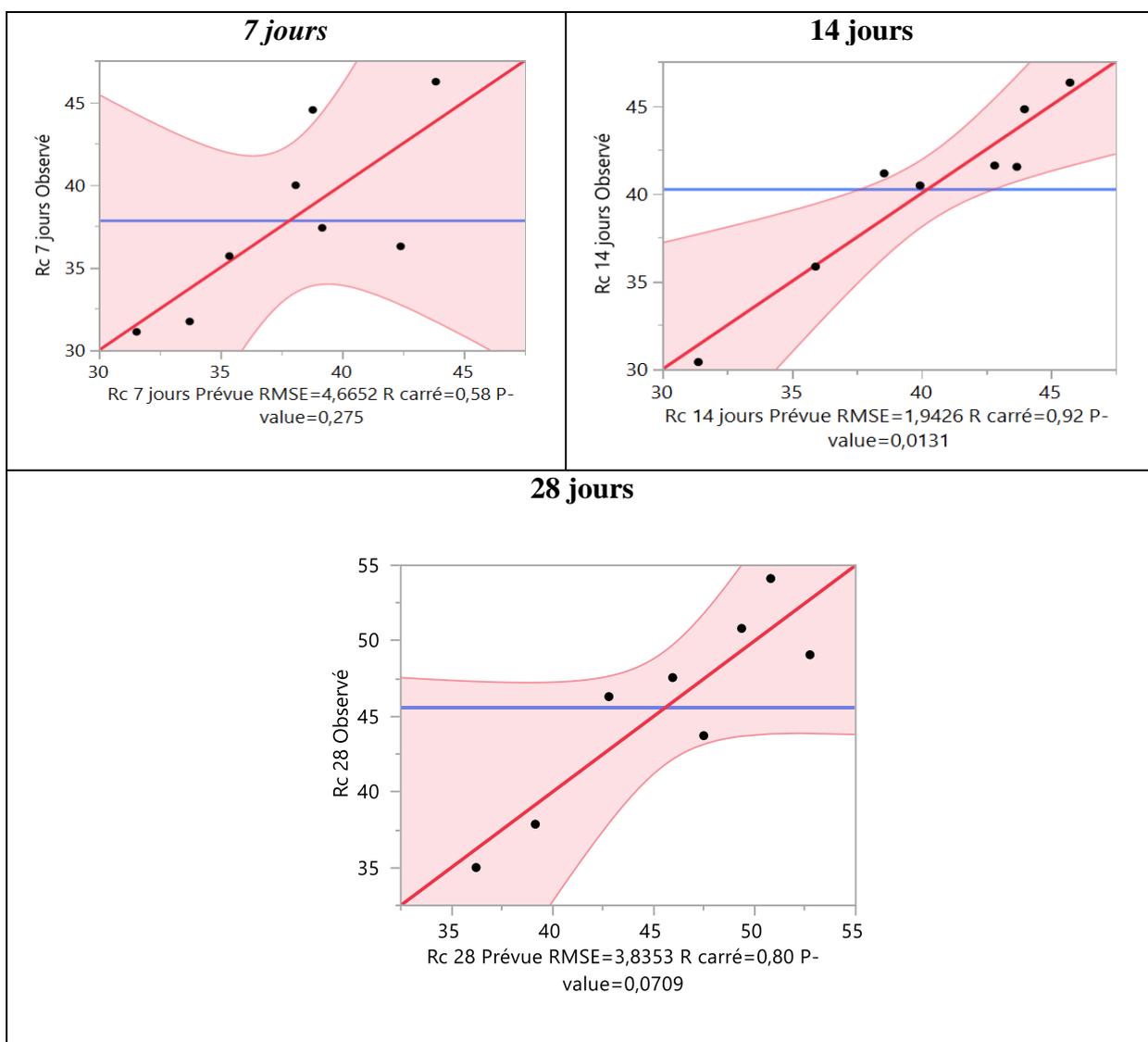
a. Expression de la prévision

$$R_{C7j} = 0.965077089 * PC + 46.74021714 * G/S - 1.77657 * PC * G/S - 0.52869623$$

$$R_{C14j} = 3.23544*PC + 17.53274*G/S - 4.48438*PC*G/S + 29.08007$$

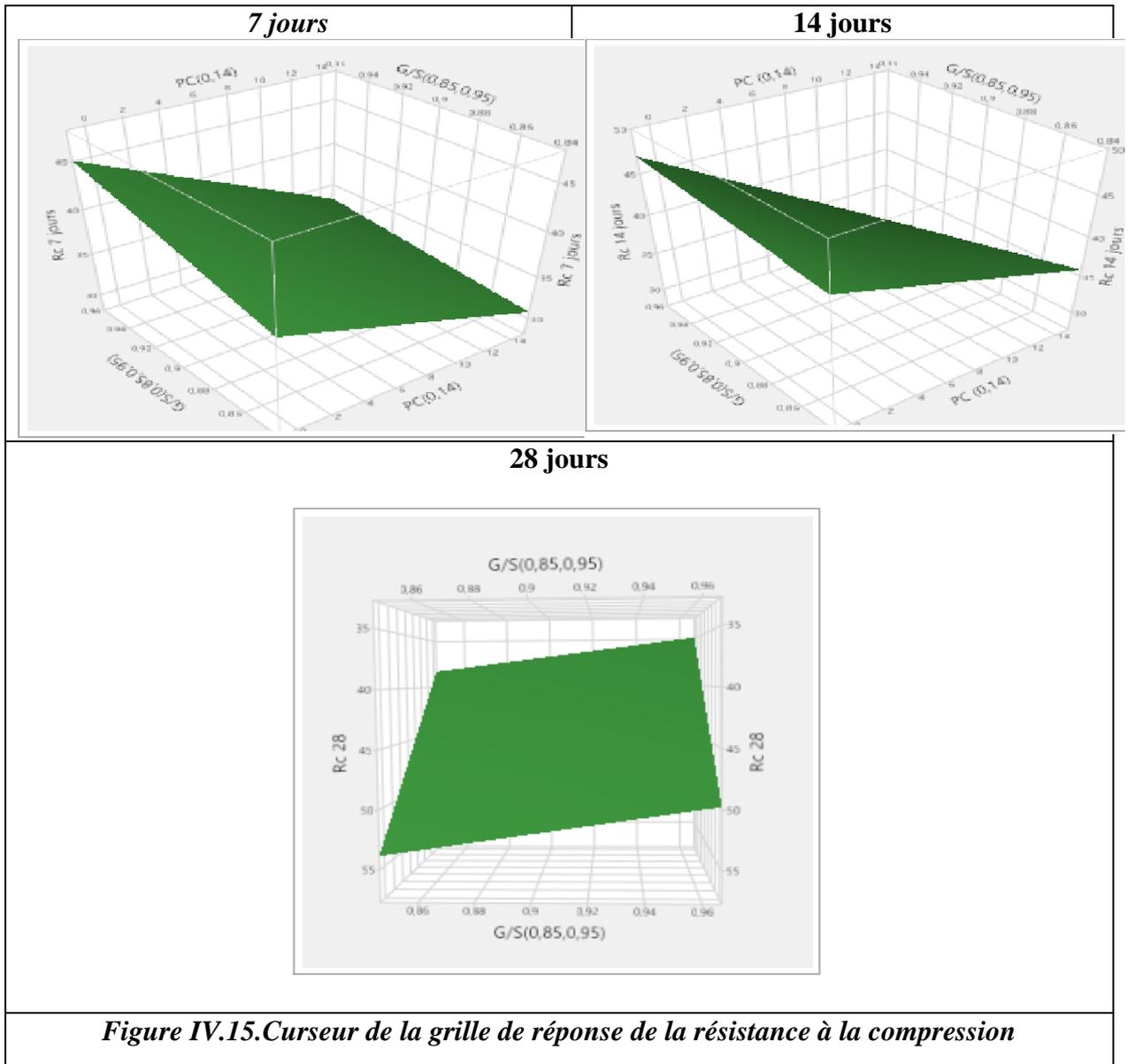
$$R_{C28j} = - 1.24314*PC + 0.32111*PC*G/S - 33.78640*G/S + 81.45709.$$

**b. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues**



**Figure IV.14. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression**

c. Curseur de la grille de réponse



IV.5.2. Résultats de la résistance à la traction par flexion  $R_f$  à 7, 14 et 28 jours

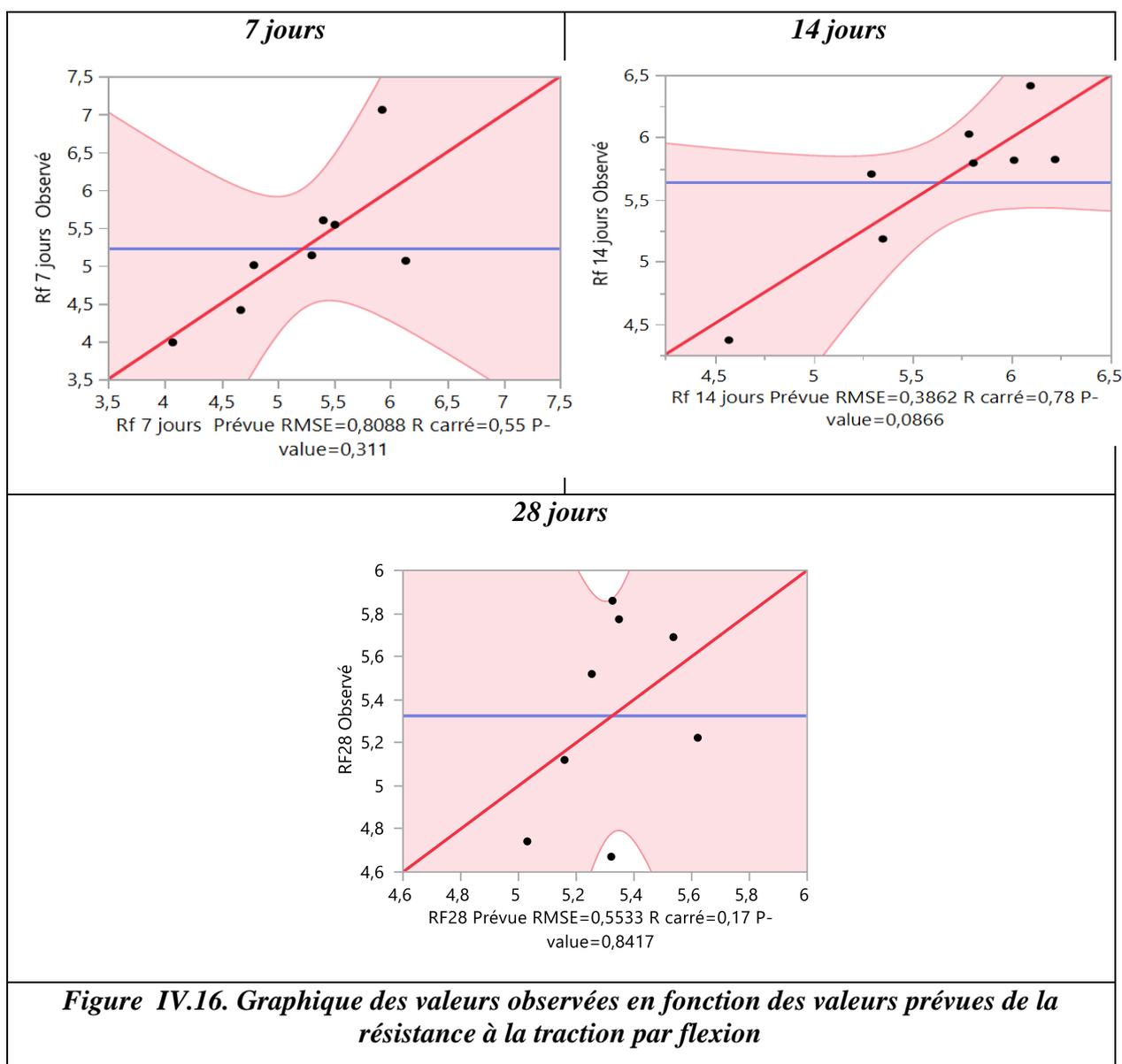
a. Expressions de la prévision

$$R_{f7j} = -0.11935*PC + 0.01768*PC*G/S - 6.26670234*G/S + 11.46203$$

$$R_{f14j} = -0.44850*PC + 0.40683*PC*G/S + 2.068222698*G/S + 4.25428$$

$$R_{f28j} = 0.23059*PC + 2.728501064*G/S - 0.28713062*PC*G/S + 3.02895$$

**b. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la traction par flexion**



**Figure IV.16. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la traction par flexion**

c. Curseur de la grille de réponse

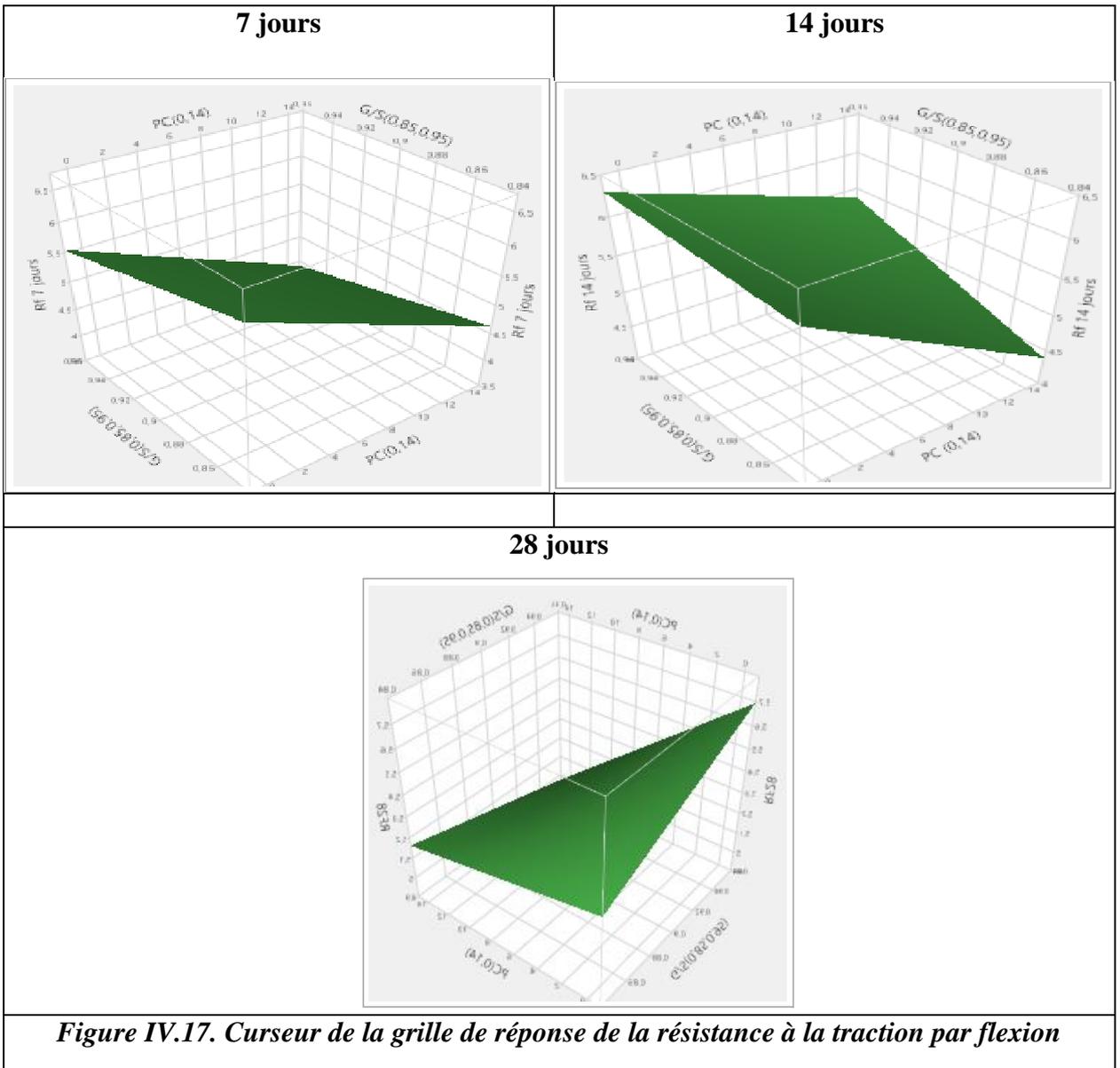


Figure IV.17. Curseur de la grille de réponse de la résistance à la traction par flexion

IV.6. Conclusion

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant avec l'ajout d'addition minérale (fillers de calcaire et poudre de céramique) avec différents pourcentages, afin de déterminer l'influence de la nature, et le pourcentage des additions sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

Nous pouvons considérer que l'ajout de la poudre de céramique non cuite en remplacement avec le ciment est très bénéfique pour certains dosages inférieurs à 14% de la masse de ciment.

L'approche des plans d'expériences est une méthode efficace et simple qui offre une meilleure analyse et une bonne interprétation par le moyen de modélisation et d'optimisation.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Ce projet de recherche dont l'objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant avec l'ajout d'additions minérales locales telle que la poudre atomisée pour céramique (PAC) avec différents pourcentages de 2, 7 et 14% par remplacement partiel de la masse du ciment, et 10% de fillers de calcaire, afin de déterminer l'influence de la nature, et le pourcentage des additions sur les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

Nous pouvons considérer que l'ajout de PAC est très bénéfique pour certains dosages inférieurs à 14%.

La composition des bétons autoplaçant donne une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage, qui constituent d'ailleurs ses spécificités, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou pratiquement très faible (de 1 à 2 mm). De plus les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

On peut conclure que les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir une viscosité aussi bonne. La nature de la poudre de céramique et sa granulométrie ainsi la finesse des ciments a un effet sur la viscosité du béton auto plaçant.

Dans l'état durci on trouve que La résistance à jeune âge pour le rapport  $G/S=0,95$  est un peu élevée à celle de  $G/S=0,85$  Mais ce n'est pas le cas à 28 jours où c'était l'inverse et Le BAP 2-2 a donné le meilleur résultat.

L'approche des plans d'expériences est une méthode efficace et simple qui offre une meilleure analyse et une bonne interprétation par le moyen de modélisation et d'optimisation.

# Liste des références Bibliographiques

- [1] OKAMURA. H. , OZAWA , K. (1994), "Self compactable high performance oncrete inJapan" ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand
- [2] <http://www.guidebeton.com/beton-autoplacant>
- [3] Article de BAP : GOODIER, C.I., 2003. Development of self-compacting concrete, Proceedings of the ICE- Structures and Buildings, 156 (4), pp. 405-414.
- [4] **Turcry.P**, " Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation", Thèsedoctorale, université de Nantes, 2004.
- [5] **-Billberg.P**, "Self-compacting concrete for civil engineering structures –the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.
- [6] domain d'utilisation des BAP/googleimage.com
- [7] **Boukni Bariza**, tenue au Feu des Bétons Autoplaçants, Mémoire de Magister
- [8] P.ROUGEAU et CH MARRY DIPPE, **O.FRANCY**, Les BAP : synthèse des connaissances et compagne
- [9] Googlephotos/ Phénomène de blocage des granulats.com
- [10]BOUCHENEB YACINE : mémoire de magistère, Retrait plastique des bétons autoplaçants ,université de Mouloud Mammeri,Tizi-Ouzou,2011.
- [11]Assie, S « Durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat de L'INSA deToulouse, 2004.
- [12]**Hanaa Fares**. Thèse de doctorat en Génie Civil « Propriétés mécaniques et physicochimiquesde bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Ecole Doctorale Sciences et IngénierieUniversité de Cergy-Pontoise.
- [13]Le site : <https://www.infociments.fr/>
- [14]Le site : <https://www.linkedin.com/pulse/quest-ce-que-les-fillers-calcaires>
- [15] **Bourema Moufida**, «Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci», Mémoire de master en génie civil, Université de 20Aout 1955-Skikda, 11 Juin 2015
- [16]Projet National de Recherche CERIB, " bétonautoplaçant BAP " France,Octobre 2001
- [17]haddad kahina « les BAP a la base des granulats de béton de démolition,

## Liste des références bibliographiques

---

- résistance et approche de la durabilité ‘ thèse master, UMMTO, TO, 2011.
- [18] J. BARON et J. OLLIVIER, les bétons bases et données pour leurs formulations, EYROLLES, 1999.
- [19] AFGC : Groupe de travail Recommandation pour l’emploi des bétons auto-plaçant, AFGC/PN B@P, Recommandations provisoires pour l’emploi des bétons autoplaçants, 63 p.
- [20] YAMMINE JOUMANA., rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat, l’Ecole Normale Supérieure de Cachan, 262 p, 2007.
- [21] Association Française de Génie Civil, "Bétons auto-plaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [22] Rissel Khelifa.M, " Effet de l’attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants", thèse de doctorat, université de Constantine et l’université d’Orléans génie civil. 2009.
- [23] IZUMI, I., YONEZAWA, T., IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) “Placing 10 000 m<sup>3</sup> superworkable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome, Supplementary” Papers, 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas,
- [24] Le site : <http://beton-bap.blogspot.com/2015/02/methodes-de-formulation.html>
- [25] Collection Technique CIMbéton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.
- [26] Thèse de doctorat présentée par Messaoudi Farid université TIZI-OUZOU année 2016.
- [27] <https://www.aquaportail.com/definition-4682-rheometre.html>
- [28] Conrrazé G., Grossiord J.L. "Initiation à la rhéologie", Tec & Doc, 3ème édition. (2000).
- [29] Evans., Letter of the editor: on the nature of the yield stress, 1992.
- [30] F. Gabryszak, sino dato « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.
- [31] <https://fr.scribd.com/document/252862862/Tp-n-5-Analyse-Par-Ultrasons-de-Beton-Durci>.
- [32] SU N., HSU K.C., CHAI H.W., "A simple mix-design method for self-

## Liste des références bibliographiques

---

- compacting concrete", Cem Concr Res, 31(12), pp1799-1807, (2001).
- [33] ADAM M.NEVILLE ( propriétés des bétons) edition Eyrolles, paris,2000,p.103-726.
- [34] Mémoire de Mahdjoub ouseaad thème propriétés des BAPs a base de déchets des brique université ZIAN ACHOR JELFA année 2017.
- [35] Mémoire de bouhbel fouad thème Calage du modèle de Mohr Coulomb à partir de l'essai à la boîte de cisaillement, en utilisant la méthode d'optimisation de Taguchi université de galma 2020.
- [36] J GOUPY · 2006 · Cité 207 fois — [14] MOZZO Gil «Plan quadratique Gigogne».
- [37] <https://slideplayer.fr/amp/13345699/?fbclid=IwAR051-1KXr0TWE9MQBkPOHGZKBZRre1ebNOFlewcmpeT0V8ouKnrxxYYvcl>.
- [38] PILLET M. (1992) ; Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, les éditions d'organisation Ed., Paris.
- [39] Mémoire de Nadia Drici thème l'optimisation des performances d'un BAP modifier par lrd plan d'expériences université de bordj Bou Arreridj 2020.