

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par : - LOURAADI Messaoud

- BAABOUCHE Hichem

### Sujet

*Optimisation de la rhéologie d'un béton fluide*

Soutenu publiquement le / / devant le jury composé de :

M/Mme nom et prénoms	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Président
M/Mme nom et prénoms	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Examineur
Mme TABET Souad	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Encadrante
M/Mme nom et prénoms	Grade	<b>Univ-BBA</b>	Co-Encadrant

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1438 هـ

# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donnés la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme notre formation et pourvoir réaliser ce travail de recherche.*

*Nous remercions nos très chers parents pour leurs présence patience et encouragement indéfectible.*

*Nous tenons à exprimer nos estime et reconnaissance envers notre encadrante Mme S. TABET pour son aide précieuse, ses conseils et ses connaissances et pour nous avoir soutenus et toujours encouragés.*

*Grandes reconnaissances à tous les enseignants du département de génie civil et spécialement Dr O. Kessel pour son aide et ses conseils.*

*Merci infiniment au staff du laboratoire de génie civil pour leurs conseils et leur orientation.*

*Merci à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce travail de près ou de loin.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents que Dieu les protège qui en le droit de recevoir mes chaleureux remerciements pour le courage et le sacrifice qu'ils ont consentis pendant la durée de mes études en leurs souhaitant une longue vie pleine de joie et de santé*

*A notre chère encadrante Mme Tabet qui a le mérite d'avoir réalisé et réussi ce travail*

*Mes chers frères Abdou et Karim pour leurs motivation et encouragement*

*A tous mes amis qui m'ont aidé durant ma vie*

*A toute ma famille et mes proches*

*A tous les membres du département de génie civil*

*A tous les étudiants de ma promotion 2023*

*A toute la famille Louraadi*

*Messaoud.*



## Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes parents pour leur soutien,  
leur patience et leurs encouragements au cours de  
ma carrière scolaire*

*À mes frères et sœurs et pour toute ma famille.  
À mon ami Messaoud, qui m'a soutenu tout au  
long de ma carrière universitaire, et à tous les  
enseignants qui m'ont mené au succès.*

*Hichem*



## 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 autoplaçant .....	2
I.3. Historique des bétons autoplaçants .....	2
I.4. Domaine d'utilisation des BAP.....	3
I.5. Avantages du béton autoplaçant.....	4
I.6. Principes de base et exigences du BAP .....	5
I.7. Normalisation du béton autoplaçant .....	5
I.8. Les critères de composition d'un béton autoplaçant .....	5
1.8.1. Un volume de pâte important .....	5
1.8.2. Une quantité de fines importante .....	6
1.8.3. L'utilisation des superplastifiants .....	6
1.8.4. Utilisation éventuelle d'un réteneur d'eau ( agent de viscosité).....	6
1.8.5. Un faible volume de gravillon .....	7
I.9. fillers calcaires .....	7
I.9.1. Les ajouts des bétons autoplaçants .....	7
I.9.2. Description des fillers calcaires .....	7
I.9.3. Avantages d'utilisation des fillers calcaires .....	8
I.9.4. Inconvénients d'utilisation des fillers calcaires .....	8
I.9.5. L'influence des fillers calcaires sur la rhéologie .....	8
I.9.5.1 Exemple d'études d'influence des fillers calcaires .....	9
I.10. Conclusion .....	10

### CHAPITRE II : Plan d'expériences et modélisation

II.1 Introduction.....	11
II.2 Définition.....	11
II.3 Avantages des plans d'expériences .....	11
II.4 Termes à retenir .....	12
II.5 Différents types de plan d'expériences .....	12
II.6 Qualité et plan d'expériences .....	12
II.7. Intérêt des plans d'expériences en génie civil .....	13
II.8 Présentation de logiciel JMP .....	13

II.9 Application de plan d'expériences .....	13
II.10. Analyse de la variance( ANOVA) .....	14
II.11. Plan de surface de réponse .....	14
II.12. Optimisation.....	16
II.13. Conclusion .....	16

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

III.1.Introduction .....	17
III.2. Présentation des matériaux utilisés.....	17
III.3. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	17
III.3.1 le sable.....	17
III.3.1.1 Essai d'analyse granulométrique .....	17
III.3.1.2. Module de finesse .....	18
III.3.1.3 Les caractéristiques physiques .....	19
III.3.1.3 Masse volumique spécifique .....	19
III.3.1.4. Equivalent de sable .....	20
III.3.2. Le gravier .....	20
III.3.2.1 Analyse granulométrique .....	20
III.3.2.2 Les caractéristiques physiques de graviers utilisé .....	21
III.3.2.2 Les caractéristiques mécaniques des graviers .....	22
III.3.3. Le ciment .....	23
III.3.3.1. Caractéristiques chimique et minéralogique de ciment .....	23
III.3.3.2. Caractéristiques physique de ciment .....	23
III.3.4. Les fillers calcaire.....	24
III.3.5. Les adjuvants.....	25
III.3.5.1 Dosage de superplastifiant.....	25
III.3.6. L'eau de gâchage.....	26
III.4. Formulation de béton autoplaçant par la méthode AFGC .....	26
III.4.1 Choix des constituants pour formuler notre BAP.....	26
III.4.2. Calcul des composantes des mélanges pour un mètre cube.....	27
III.5. Procédures de fabrication des BAPs .....	29
III.6. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais.....	29
III.6.1 L'essai d'étalement au cône d'Abrams.....	29
III.6.2 L'essai de la boîte en L.....	30
III.6.3. Stabilité au tamis .....	31
III.6.4. Essai au rhéomètre.....	31
III.6.5. Confection des éprouvettes .....	32
III.6.6. Conservation des éprouvettes.....	32
III.7. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci.....	32

III.7.1. Les essais destructifs.....	32
III.7.2. Les essais non destructifs.....	33
III.8. Conclusion.....	34

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

<b>Partie 01: Résultats et interprétations.....</b>	<b>35</b>
IV.1. Introduction.....	35
IV.2. Résultats des essais à l'état frais.....	35
IV.2.1. Résultats des essais de caractérisation des BAPs.....	35
Comportement rhéologique des BAPs.....	38
IV.3. Résultats des essais à l'état durci.....	40
IV.3.1. Les essais destructifs.....	40
IV.3.1.1. La résistance à la compression.....	40
IV.3.1.2. La résistance à la traction par flexion.....	43
IV.3.2. Variation de densité à l'état durci.....	45
IV.3.3. Les essais non destructifs.....	46
<b>Partie 02 : modélisation et analyse des résultats.....</b>	<b>47</b>
IV.4. Modélisation et Analyse des résultats à l'état frais.....	47
IV.5. Modélisation et Analyse des résultats à l'état durci.....	51
IV.5.1. Résultats de la résistance à la compression $R_c$ à 7, 14 et 28jours.....	51
IV.5.2. Résultats de la résistance à la traction par flexion $R_f$ à 7, 14 et 28jours.....	52
IV.6. Conclusion.....	54
Conclusion générale.....	55
Références bibliographiques	

## Liste des tableaux

Tableau III.1. Analyse granulométrique du sable.....	18
Tableau III.2. Classification du sable en fonction du module de finesse.....	19
Tableau III.3. Les caractéristiques physiques du sable utilisé .....	19
Tableau III.4. L'analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16.....	21
Tableau III.5. Les caractéristiques physiques du gravier utilisé .....	22
Tableau III.6. Classification des roches en fonction du coefficient LA .....	23
Tableau III.7. Les compositions chimiques et minéralogiques du CEMII/B42.5 .....	23
Tableau III.8. Caractéristiques physiques du CEMII/B42,5 .....	24
Tableau III.9. Les compositions chimiques et les propriétés physiques du calcaire .....	25
Tableau III.10. Caractéristiques de l'adjuvant «MEDAFLOW30».....	26
Tableau III.11. Formulation des BAP de rapport G/S= 1 par la méthode LCPC.....	28
Tableau III.12. Formulation des BAP de rapport G/S=0.9 par la méthode LCPC.....	29
Tableau IV.1. Résultats des essais à l'état frais .....	36
Tableau IV.2. Caractéristiques rhéologiques des BAP mesurées par rhéomètre.....	39
Tableau IV.3. La résistance à la compression des BAP.....	44
Tableau IV.3. Résultats de la résistance à la flexion .....	46
Tableau IV.4. Variation de densité à l'état durci.....	48
Tableau IV.4. la vitesse de propagation par ultrason des BAP à 28 jours .....	49

## Liste des figures

Figure I.1. Application de béton fluide.....	2
Figure I.2. Arlanda Airport Control Tower, stockholm sweden .....	4
Figure I.3. Béton autoplaçant pour ouvrages verticaux.....	4
Figure I.4. Défloculation de ciment par les uperplastifiants.....	6
Figure I.5. Différence entre BAP et BO .....	7
Figure I.6. Illustration d'effet filler .....	8
Figure II.1.Utilisation de JMP.....	15
Figure II.2. Surface de réponse .....	16
Figure III.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf .....	18
Figure III.2. Masses volumique apparente et absolue du sable.....	20
Figure III.3. Essais équivalent de sable.....	20
Figure III.4. Courbes granulométriques du gravier 8/16 et 3/8 .....	20
Figure III.5. Essais masse volumique apparente et absolue de gravier.....	22
Figure III.6. Essais de los Angeles.....	22
Figure III.7. Essais masse volumique de ciment.....	23
Figure III.8. Filler calcaires broyés .....	24
Figure III.9. Détermination du point de saturation au mini cône.....	25
Figure III.10. L'essai d'étalement .....	30
Figure III.11.L'essai de la boîte en L .....	30
Figure III.12. L'essai stabilité au tamis .....	31
Figure III.13. Essai au rhéomètre .....	32
Figure III.14. Bac de conservation des éprouvettes .....	32
Figure III.15. L'essai de compression .....	33
Figure III.16. L'essai de la résistance à la traction par flexion.....	33
Figure III.17. L'essai d'ultrason.....	34
Figure III.18. L'essai de scléromètre.....	34
Figure IV.1. Résultats de l'essai de l'étalement.....	36
Figure IV.2. Résultats de l'essai de l'écoulement.....	37
Figure IV.3. Résultats de l'essai de stabilité au tamis .....	37
Figure IV.4. Les variations de la masse volumique des différents BAP formulés .....	37
FigureIV.5. Les variations de la viscosité des différents BAP formulés.....	39
Figure IV.6. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque).....	40
Figure IV.7. Résistance à la compression des BAPs à 7, 14 et 28jours .....	45
Figure IV.8.histogrammes des résistances à la flexion pour les différents âges de BAP.....	47
Figure IV.9. Histogrammes de variation de densité des BAP à l'état durci.....	48
Figure IV.10.Vitesse du son des différents types de béton.....	49
Figure IV.11. Histogrammes des résistances par scléromètre .....	50
Figure IV.12. Curseur de la grille de réponse des essais à l'état frais.....	54
Figure IV.13. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression.....	55
Figure IV.14. Curseur de la grille de réponse de la résistance à la compression.....	56
Figure IV.15. Graphique des valeurs observées de la résistance à la traction par flexion .....	58
Figure IV.16. Curseur de la grille de réponse de la résistance à la traction par flexion.....	59

## **Liste des abréviations**

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

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

**BAP** : Béton auto plaçant.

**BO** : Béton ordinaire.

**M<sub>f</sub>**: module de finesse du sable.

**Sp** : super plastifiant.

**FC** : Filler de calcaire

**R<sub>c</sub>** : 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

Notre recherche est basée sur l'expérimentale et la modélisation par plan d'expériences d'un béton autoplaçant, où on va analyser l'influence du rapport G/S, qui est pris égal à 1 et 0,9, sur ces performances rhéologiques et mécaniques, et ce en remplaçant partiellement la masse du ciment par différents pourcentages (10, 15 et 20%) de Fillers calcaires (FC), utilisé dans le domaine de construction.

L'ajout de FC est très bénéfique pour certains dosages jusqu'à 20%.

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

**Mots clés :** béton autoplaçant – rhéologie – rhéomètre – plan d'expériences– filler calcaire.

## Abstract

Our research is based on experiments and modeling by design of experiments where we will analyze the influence of the G/S ratio, which is taken equal to 1 and 0.9, on the rheological and mechanical performance of a modified self-compacting concrete, by partially replacing the cement mass with different masses in percentage (10, 15 and 20%), Limestone Filler (FC), used in the construction field.

The addition of FC is very beneficial for certain dosages up to 20%.

The mixtures were fluid enough to have such good viscosity.

**Keywords:** self-compacting concrete – rheology – rheometer – experimental design – limestone filler.

## ملخص

في هذه الدراسة، سنقوم بتحليل تأثير نسبة G/S لخرسانة ذاتية التموضع والتي تؤخذ مساوية لـ 1 و 0.9 ، على الأداء الريولوجي والميكانيكي لخرسانة مضغوطة ذاتيًا معدلة ، عن طريق الاستبدال الجزئي لكتلة الأسمنت بكتل مختلفة بالنسب المئوية (10 ، 15 و 20%) من حشو الحجر الجيري (FC)، والذي يستخدم في مجال البناء.

تعد إضافة FC مفيدة جدًا لجرعات معينة تصل إلى 20%.

كانت المخاليط سائلة بدرجة كافية للحصول على لزوجة جيدة.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المضغوطة ذاتيًا - الريولوجيا - مقياس الانسيابية - تصميم التجارب - الحجر الجيري.

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Le béton autoplaçant BAP (Self Compacting Concrete) constitue une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main d'œuvre de moins en moins qualifiée, cette gamme de béton est caractérisée par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et donne des structures résistantes et durables.

Notre recherche est basée sur l'expérimental et la modélisation par plan d'expériences. Cette nouvelle technique va nous permettre de minimiser le nombre des essais, d'obtenir le maximum d'informations et de quantifier l'influence des paramètres rhéologiques, pour aboutir à la formule optimale d'un béton autoplaçant en substituant partiellement le ciment par des pourcentages (10%, 15% et 20%) de Fillers calcaires broyés, en fixant le rapport E/C et le dosage en superplastifiant qui est celui de saturation mais en faisant varier le rapport G/S (1 et 0.9) pour chaque pourcentage. Les résultats vont être comparés avec un mélange témoins où le pourcentage de substitution est nul.

L'objectif de notre expérience c'est d'analyser l'influence des fillers calcaires sur les performances et les comportements rhéologiques de BAP à l'état frais et à l'état durci, ainsi que leurs intérêts techniques, économiques, écologique et environnemental.

### **Notre mémoire est organisé comme suit :**

*Une partie théorique* : qui contient deux chapitres, le premier chapitre composé de première partie qui donne des généralités sur le béton autoplaçant et de deuxième partie destinée pour une recherche bibliographique sur l'influence de filler de calcaire sur les différents comportements de BAP. Quant au deuxième chapitre, on va traiter la modélisation par plans d'expériences avec la présentation et l'application du logiciel JMP.

*Une partie expérimentale* : où on va exposer les différents essais de caractérisations liés aux matériaux utilisés et ceux liés à la caractérisation et formulation du BAP avec l'utilisation d'un rhéomètre ICAR pour déduction des paramètres rhéométriques, dans un troisième chapitre. Par la suite analyser, modéliser par plan d'expériences et discuter les résultats expérimentaux trouvés comme quatrième chapitre.

*Et enfin une Conclusion générale avec perspectives.*

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

## Chapitre I

### Caractéristiques des bétons autoplaçants

#### I.1 Introduction

Le Béton Autoplaçant BAP développé depuis une trentaine d'années, est encore à l'heure actuelle qualifié de nouveau béton car son utilisation ne nécessite pas de vibration pour être mis en œuvre et il peut être facilement coulé dans les zones très ferrillées et dans les zones complexes et difficilement accessibles. Il se caractérise essentiellement par sa fluidité à l'état frais et son homogénéité à l'état durci. Dans ce qui suit, on va citer des généralités sur le BAP, comme on va exposer quelques travaux qui traitent les effets des fillers calcaires sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci.

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

Le béton autoplaçant (en anglais Self compacting concrete SSC) est un matériau nouveau, spécial à haute performance. Sa consistance est très fluide et très déformable, il se place tout seul, sans vibration, dans un coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, grâce au seul effet de son propre poids. Il est capable de remplir complètement le coffrage tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène du transport, du pompage et de la mise en œuvre [1].



Figure I.1. Application de béton fluide (guide de béton.com/image).

#### I.3 Historique des bétons autoplaçants

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure. Les chercheurs et les industriels japonais n'ont pas

tout de suite publié leurs recherches. La viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée. Plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacrées. Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de quelques années. L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988 pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferrailés et des façades à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication. Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçant dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles [2 3 4].

#### **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) [5].

Le BAP est particulièrement adapté 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 [4].
- Des accès difficiles voire impossible pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration

Le BAP est une solution bien adaptée pour [6] :

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis.
  - Radiers.
  - Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
  - Rattrapage de niveau en rénovation.
  - Fondations superficielles.
  - Voiles, poteaux, poutres



Figure I.2. Arlanda Airport Control Tower  
Stockholm, Sweden [4]



Figure I.3. Béton autoplaçant pour ouvrages  
verticaux [4]

## I.5 Avantages du béton autoplaçant

L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent deux intérêts technico-commerciaux [7] :

- **Facilité et rapidité de mise en place :**
  - Diminution du temps de réalisation permettant d'augmenter la capacité de construction ;
  - Diminution du personnel donc du coût de la main-d'œuvre ;
  - La possibilité d'utiliser des coffrages de formes complexes et de forte densité d'armatures ;
- **Amélioration de la qualité du béton, qui est indépendante du savoir-faire des ouvriers:**
  - Amélioration de la résistance grâce à l'augmentation de la compacité et la diminution de la porosité ;
  - Assure une bonne étanchéité à l'eau et offre ainsi des propriétés de transport réduites et une durabilité adéquate ;
  - Écoulement facile à travers et autour de l'acier d'armature sous son poids propre et sans besoin d'équipement de vibration ou de compactage permettant ainsi une réduction des nuisances sonores et améliorant l'environnement de travail et la sécurité ;
  - Favorise le bétonnage en grande masse dans les sections à géométrie complexe fortement ferrillée ;
  - Améliore l'aspect esthétique du béton et fournit la bonne finition sans aucun pore extérieur

## **I.6 Principes de base et exigences du BAP**

En ce qui concerne sa composition, le BAP est composé à peu près des mêmes matériaux constitutifs que le béton ordinaire BO : ciment, granulats, eau plus les adjuvants chimiques et les additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau, filler calcaire, pouzzolane, poussière de fours, etc.). Habituellement, les adjuvants chimiques utilisés sont de type super plastifiant à haute réduction d'eau et éventuellement les agents modifiants de la viscosité. Les additions minérales sont utilisées, outre le ciment, comme matériau extra-fin et dans certains cas, elles remplacent le ciment. Cependant, il faut prendre un volume important en super plastifiant pour améliorer l'ouvrabilité et la viscosité apparente du BAP et pour tenir compte le volume important des éléments fins qui jouent le rôle de disperser les gros granulats afin de faciliter l'écoulement [8].

## **I.7 Normalisation du béton autoplaçant**

Le béton autoplaçant fait l'objet de règles complémentaires dans la norme **NF EN 206- 9**. Cette norme précise les règles qui s'appliquent au BAP en complément des règles communes aux bétons spécifiées dans la norme **NF EN 206-1**.

### **➤ La norme NF EN 206-1**

- Au courant de l'année 2004, la norme NF EN 206-1 a été publiée en France afin de remplacer l'ancienne norme expérimentale XP P 18-305, concernant la fabrication des bétons de structure. Cette norme a entraîné des modifications au niveau des critères de résistance, des contrôles à effectuer, des classes d'environnement des bétons, elle s'applique à tous les bétons de structure, bétons fabriqués sur chantier, bétons prêts à l'emploi et bétons pour produits préfabriqués.

### **➤ La norme NF EN 206-9**

- Cette norme complète la norme NF EN 206-1 et donne les règles qui s'appliquent au béton autoplaçant (BAP). Les règles communes ne sont pas reprises dans cette norme

## **I.8 Les critères de composition (formulation) d'un béton autoplaçant**

Après plusieurs recherches effectuées au laboratoire par beaucoup de chercheurs, les essais montrent que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques soit [7] :

### **I.8.1 Un volume de pâte important**

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la

capacité au remplissage des bétons, le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air) tant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume est donc élevé.

### I.8.2 Une quantité de fines (80 $\mu$ m) importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 Kg/m<sup>3</sup>) supérieure à celle des bétons conventionnels.

### I.8.3 L'utilisation des superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides, ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre et plus importante, toutefois un dosage très élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter les sensibilités du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis de problème de la ségrégation et de ressuage.

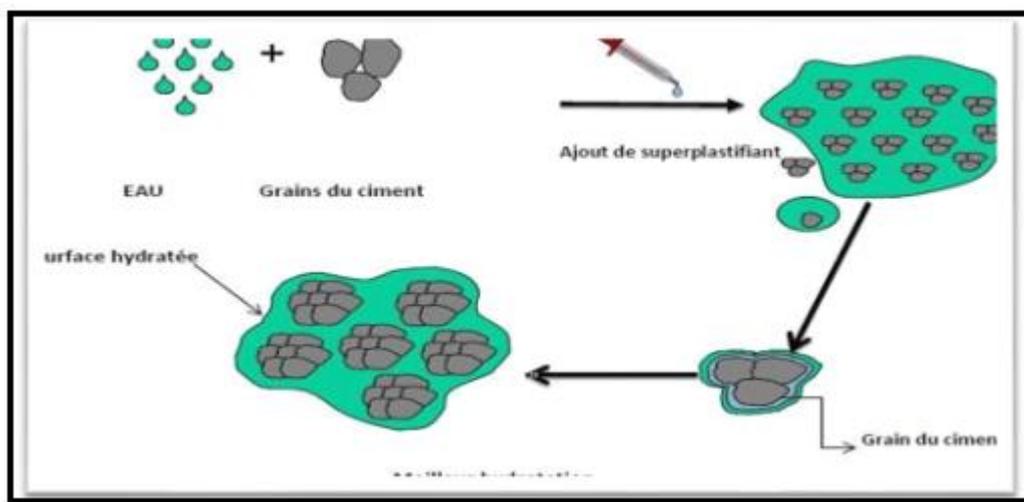


Figure I.4 Défloculation de ciment par le superplastifiant [7]

### I.8.4 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (agent de viscosité)

L'agent d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point. Les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ces produits comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus apaise.

L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

### I.8.5 Un faible volume de gravillon

Il est possible d'utiliser les 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 de béton en zone confinée. Il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité de squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En générale ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillons sable de l'ordre 1 dans le BAP.

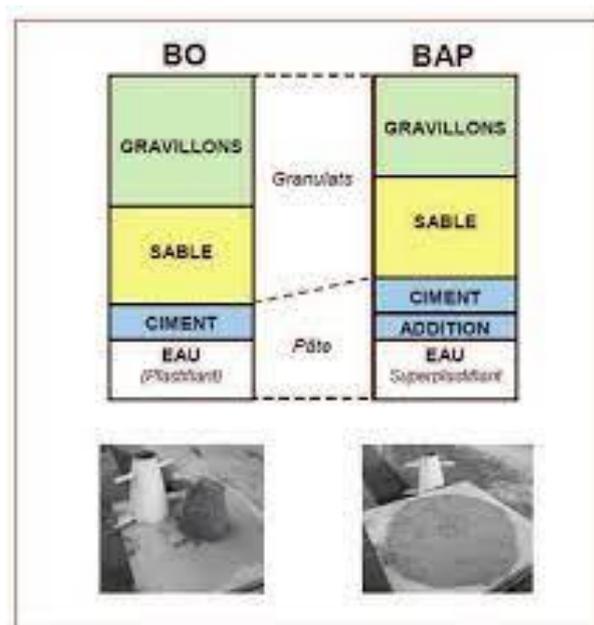


Figure I.5. La différence entre un béton ordinaire BO et un BAP

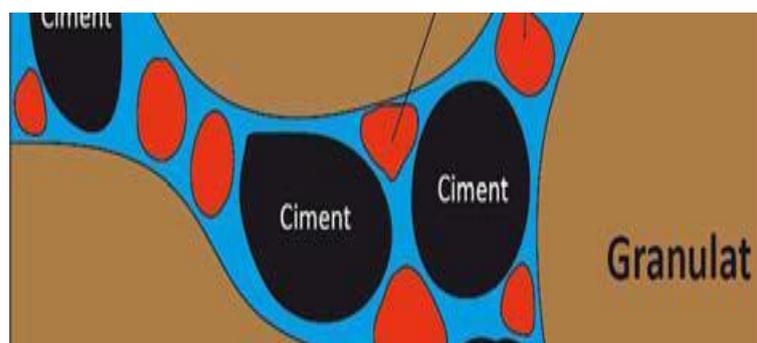
## I.9 Fillers calcaires

### I.9.1 Les ajouts des bétons autoplaçants :

On peut optimiser les comportements rhéologiques des BAP par des différentes additions comme la poudre de céramique, déchets de marbre et de brique, les granulats recyclés, poudre de verre...et parmi les ajouts les plus utilisés et plus efficaces au béton autoplaçant, on cite les fillers de calcaire pas seulement pour l'optimisation mais aussi pour des avantages techniques, économiques et environnementale.

### I.9.2 Description des fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (Calcaires, bentonite, etc.) Présentant une teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  Supérieure à 75%. Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcaires finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbe granulométrique utilisés aussi pour augmenter la quantité des fines [7].



**Figure I.6. Illustration de l'effet filler [7]**

Les fillers calcaires interviennent dans la rhéologie des pâtes de ciment par leur granularité et leur réactivité chimique. Ils forment avec la pâte de ciment une liaison qui améliore la résistance mécanique par comparaison à l'effet d'un filler inerte comme le quartz. Cette liaison peut être renforcée par l'utilisation des fillers mixtes (calcaire + silice réactive) ou de rapport eau/ciment plus faible. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron. Les fillers se différencient les uns des autres par : Leurs origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui'ils contiennent. Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface. Leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine [7].

### **I.9.3 Avantages d'utilisation des fillers calcaires**

Le principal avantage des fillers calcaires est : de réduire le coût final unitaire du ciment en réduisant son contenu énergétique. De plus, l'addition de fillers calcaire au clinker permet d'augmenter significativement la capacité de mouture des broyeurs, et d'améliorer les propriétés physiques du béton, à savoir l'ouvrabilité du béton frais, tout en permettant de densifier la matrice de mortier en retenant de l'eau aussi pour améliorer les comportements rhéologiques à l'état frais et à l'état durci.

### **I.9.4 Inconvénients d'utilisation des fillers calcaires**

Les fillers calcaires présentent deux inconvénients majeurs :

- La diminution légère des résistances en compression à court terme des bétons.
- La vulnérabilité du béton frais contenant des fillers calcaires au retrait plastique [7].

### **I.9.5 L'influence des fillers calcaires sur la rhéologie**

L'influence des fillers calcaires sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (perte de maniabilité, baisse de résistances). Du fait de sa grande utilisation dans l'industrie, de nombreuses

études ont montré généralement le rôle important des fillers dans les bétons, les mortiers, en soulignant que leur présence excessive était souvent un facteur néfaste. Toutefois, ces études ont été réalisées le plus souvent sur des mortiers normaux dans lesquels une partie du sable ou du ciment a été substituée par des fillers calcaires.

### I.9.5.1 Exemples d'études de l'influence des fillers calcaires

- ❖ **Benachour et al el Hilali** ont trouvé que l'ajout de fillers calcaires de surface spécifique élevée améliore la fluidité des BAP, particulièrement en milieu confiné. Les fillers font augmenter la compacité du mélange, améliorent la résistance à la ségrégation et la robustesse de la formulation [9].
- ❖ **Esping** a montré que : Pour un dosage en eau constant à l'échelle du béton, le seuil de cisaillement et la viscosité sont augmentés avec l'augmentation de la surface spécifique du filler mesurée par la technique BET (Bureau d'Etude Technique) [10].
- ❖ **El Barrak** a montré que : Les fillers calcaires ont une bonne affinité avec la matrice cimentaire. Par ailleurs, ils confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de limiter le ressuage et la ségrégation [11].
- ❖ **Benachour et al** ont observé que : le mortier qui contient un taux de fillers calcaire supérieur à 15% par substitution au sable est plus ferme [12].
- ❖ **Felekoglu** [13] ont montré que : les fillers calcaires augmentent la viscosité des pâtes de ciment, en améliorant la stabilité et la non-ségrégation, pour un dosage en superplastifiant et un rapport eau/ (ciment+fillers) constants. Le même auteur Felekoglu a fait une étude comparative entre un sable riche et un sable pauvre en fines dans les bétons autoplaçants. Un sable naturel lavé, un sable calcaire concassé lavé et deux autres sables calcaires contenant différents taux de fines ont été utilisés pour déterminer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Il a été observé que les fines calcaires du sable concassé augmentent la déformabilité de la pâte fraîche et la viscosité plastique des BAP. Comparé aux BAP formulés avec des sables lavés, la stabilité et la déformabilité sont améliorées avec l'utilisation des sables concassés riches en fines. Ces BAP présentent alors des meilleures performances à l'état frais sans diminution de la résistance à la compression à l'état durci.
- ❖ **Yahia et al.** ont montré que chaque rapport E/C correspond à un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire. Au-delà de ce seuil, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes et donc la viscosité sera plus élevée [14].
- ❖ **Taleb** a constaté que le besoin en eau est plus important lorsqu'il s'agit d'utiliser des fines minérales en substitution d'une partie de ciment et d'après les résultats obtenus il a souligné

que les fillers calcaires font diminuer la viscosité du béton jusqu'à un certain taux de substitution, au-delà duquel les frictions entre les particules deviennent plus importantes et font augmenter, par conséquent, la viscosité du mélange [15].

- ❖ **Ghezal** a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3mm et un ciment portland. L'auteur a constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes (Cité par Bensebti, 2008) [16].
- ❖ **Zhu et al.** ont étudié l'influence de différents types de fillers calcaires sur les BAP. Ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvant que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption [17].
- ❖ **Bouhamou et al.** ont souligné que le ressuage diminue lorsque le dosage en fines est augmenté parce que les particules fines s'hydratent plus rapidement et aussi parce que leur taux de sédimentation est plus faible. Ils ont remarqué aussi que l'augmentation du dosage en fines calcaires engendre une diminution du taux de remplissage à cause de l'augmentation de la viscosité [18].
- ❖ **Diamantonis et al.** ont montré que : le filler calcaire est le meilleur matériau qui peut être utilisé comme un additif dans les BAP parce qu'il améliore le comportement rhéologique de la pâte de ciment, puisque les mélanges qui contiennent les fillers ont une faible valeur de taux de cisaillement par rapport aux mélanges qui contiennent les fumées de silice, les cendres volantes, ou la pouzzolane [19].

## **I.10 Conclusion**

A l'objectif d'évaluer les exigences techniques économiques et des impacts environnementales dans la confection des bétons, on peut réaliser des bétons autoplaçant avec l'ajout ou la substitution des fillers calcaires avec une très bonne performance à l'état frais ainsi qu'à l'état durci, les recherches sur l'impact de filler calcaire ont été réalisées depuis la fin du 20ème siècle et jusqu'à nos jours.

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

## Chapitre II

# La modélisation par les plans d'expériences

### II.1 Introduction

Le terme « plans d'expériences » est une approche statistique qui constitue une branche de la mathématique appliquée, permettant aux scientifiques et aux ingénieurs d'évaluer efficacement l'effet de multiples variables d'entrée appelées facteurs sur une variable de sortie ou plusieurs appelées réponses. Cette technique 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 les performances du système étudié [20].

### II.2. Définition des plans d'expériences

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,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . 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 [21].

Afin d'obtenir des informations pertinentes une démarche méthodologique doit être suivie:

- Définition des objectifs et critères ;
- Définition des facteurs à étudier et du domaine expérimental ;
- Construction du plan d'expériences ;
- Expérimentation et analyse des résultats ;
- Conduite éventuelle d'essais supplémentaires ;
- Validation des résultats ;
- Conclusion de l'étude.

### II.3. Avantages de la méthode des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont les suivants [22] :

- ❖ Diminution du nombre d'essais ;
- ❖ Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs
- ❖ Détection des interactions entre les facteurs
- ❖ Modélisation des réponses étudiées
- ❖ Précision optimale des résultats.

## II.4 Termes à retenir

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié, pour cela quelques termes utilisés sont définis comme suit [23] :

**La réponse** : grandeur physique étudiée  $n$  ;

**Les facteurs** : grandeurs physiques, sensées influencées sur les variations de la réponse.

On peut distinguer deux types de facteurs :

**Les facteurs contrôlables** : ce sont des facteurs modifiables (réglables) par l'expérimentateur leur valeur varie de façon programmée d'un essai à l'autre.

**Les facteurs non contrôlables** : leurs niveaux varient de façon anarchique d'un essai à l'autre lors de l'expérimentation.

**Domaine expérimental** : délimite la zone d'étude des facteurs qui éventuellement influence le système.

**Effet d'un facteur** : l'effet d'un facteur sur la réponse s'obtient en comparant les valeurs prises par réponse quand il passe du niveau minimal au niveau maximal.

**Interaction entre deux facteurs** : Il y a interaction entre deux facteurs si l'effet d'un facteur sur la réponse dépend du niveau de l'autre facteur ou inversement.

## II.5 Différents types de plans d'expériences

Trois grandes familles de plans d'expériences :

- a. Plan factoriel complets à deux niveaux.
- b. Plan fractionnaire à deux niveaux.
- c. Plan de mélange.

## II.6 Qualité et plan d'expériences :

La maîtrise de la qualité passe par la connaissance des facteurs influents.

Les grandes questions auxquelles répondent les plans d'expériences sont les suivantes :

- Quels sont les facteurs qui ont un rôle majeur ?
- Quels sont ceux qui n'ont aucune influence sur la réponse étudiée ?
- Quelle est la valeur de cette influence ?
- Les interactions entre facteurs sont-elles significatives ?
- Peut-on exprimer la relation entre la réponse et les facteurs principaux ainsi que leurs interactions ?

## II.7 Intérêt des plans d'expériences en génie civil

Alors en génie civil et précisément en matériaux de construction, il est très important d'utiliser les plans d'expériences pour minimiser le nombre des essais et pour avoir une prévision et rapprocher nos expériences et aussi pour permettre d'évaluer les statistiques des résultats obtenus à différents facteurs par une méthode plus rapide et plus efficace. Pour cela on a fait des recherches bibliographiques sur les plans d'expérience en génie civil.

Voici quelques études basées sur l'utilisation des plans d'expérience en génie civil :

- Optimisation des paramètres géotechnique des sols par la méthode de Taguchi [24] ;
- Comportement des bétons par plans d'expérience thèse de doctorat [25] ;
- Utilisation des plans d'expérience pour la formulation des bétons [26] ;
- Optimisation par plan de mélange de la formulation des matériaux de construction en génie civil "Cas du bétons hydraulique" [27] ;
- Richard Linder** explique dans son livre « les plans d'expérience » l'utilisation dans le domaine des essais en chimie et en matériaux en génie civil et le comportement physicochimique des bétons [28].

## II.8 Présentation du logiciel « JMP »

JMP est un puissant outil interactif de visualisation des données et d'analyse statistique. Il permet d'analyser des données et d'interagir avec elles via des tables, des graphiques, des diagrammes et des rapports afin d'en tirer un maximum d'enseignements.

JMP permet aux chercheurs de réaliser une large gamme d'analyses et de modélisations statistiques. Il est également utile à l'analyste commercial qui souhaite découvrir rapidement des tendances et des modèles dans les données. Avec JMP, vous n'avez pas besoin d'être un expert en statistiques pour faire parler vos données. Par exemple, vous pouvez utiliser JMP pour :

-  Créer des graphiques et des diagrammes interactifs pour explorer vos données et découvrir des relations
-  Découvrir des modèles de variation prenant en compte plusieurs variables à la fois
-  Explorer et synthétiser de grandes quantités de donnée
-  Développer de puissants modèles statistiques afin de prévoir l'avenir [29].

## II.9 Application de plan d'expériences

On prend comme exemple notre travail par plans d'expérience dans notre thème et on a choisi deux facteur pour modéliser les résultats.

**Les facteurs :**

- Le rapport G/S : on prend deux niveaux 0.9 et 1
- Filler calcaire ; on prend quatre niveaux 0 , 10, 15 et 20

**Les réponses :**

- A l'état frais : L'étalement, l'écoulement, stabilité au tamis, viscosité et la densité ;
- A l'état durci : la résistance à la compression et à la traction par flexion pour différents âges.

Pour interpréter les résultats on a choisi le logiciel JMP pour donner les critères suivants :

- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues ;
- Les expressions de la prévision ;
- Curseur de la grille de réponse ;
- Et d'autres paramètres montrés dans la figure II.1 (a-f).

## **II.10 Analyse de la variance (ANOVA)**

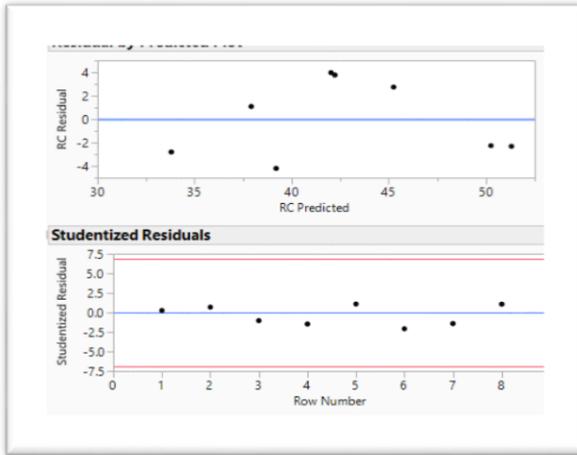
L'analyse de variance (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA : analysis of variance) est un permettant de vérifier que plusieurs échantillons sont issus d'une même population. Ce test s'applique lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles (appelées alors facteurs de variabilité, leurs différentes modalités étant parfois appelées « niveaux ») qui ont de l'influence sur la distribution d'une variable continue à expliquer. On parle d'analyse à un facteur, lorsque l'analyse porte sur un modèle décrit par un facteur de variabilité, d'analyse à deux facteurs ou d'analyse multifactorielle [30].

## **II.11. Plan des surfaces de réponse**

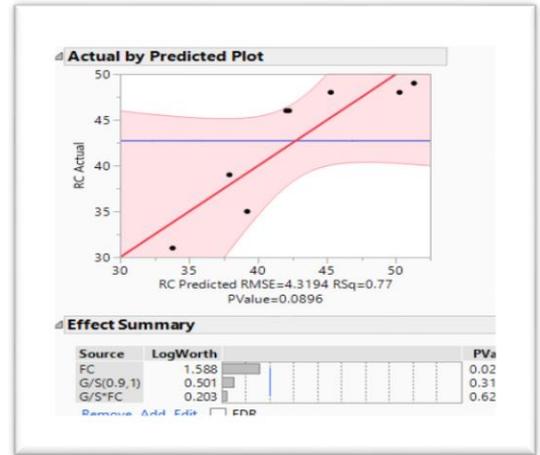
Différentes méthodologies des surfaces de réponse sont disponibles pour la réalisation des expériences. Ces plans diffèrent les uns des autres par rapport à leur sélection de points expérimentaux et le nombre des essais. Les modèles expérimentaux utilisés couramment sont :

- ❖ Les plans de Doehlert ;
- ❖ Les plans de Box-Behnken ;
- ❖ Les plans composites centrale ...etc

Le plan composite centrale représente un bon choix en raison de son efficacité élevée par rapport au nombre d'essais nécessaires. Le plan composite centrale fractionnaire a été appliqué afin d'optimiser les niveaux des facteurs permettant d'améliorer la réponse [31].



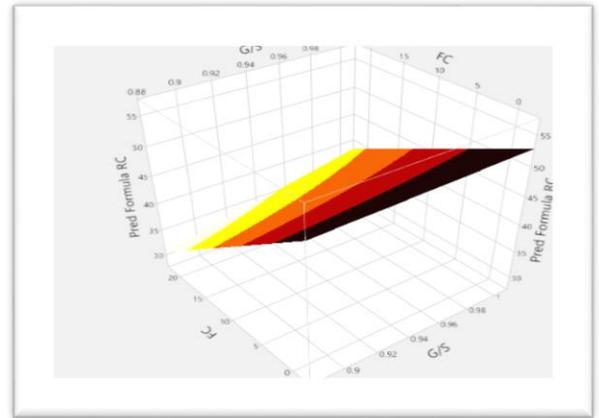
(a)



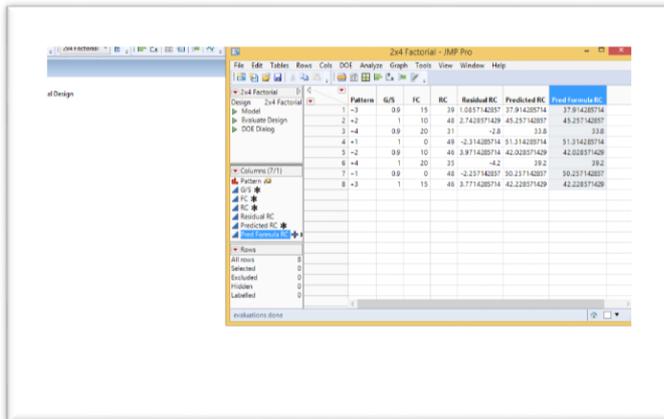
(b)



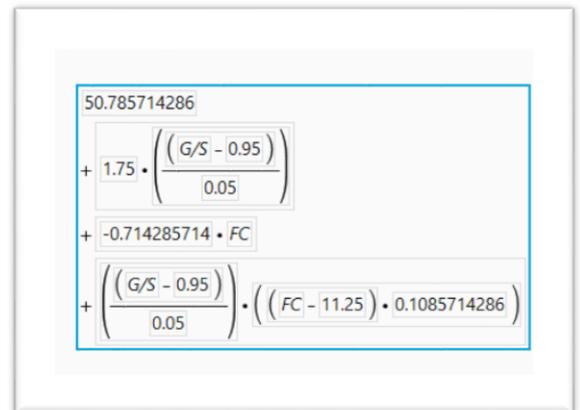
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure. II.1 (a-f). Applications du JMP [25]

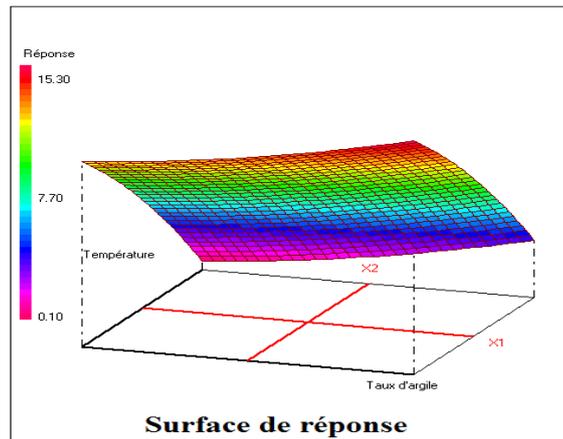


Figure. II.2. Surface de réponse [31]

### I.12. Optimisation

La recherche de conditions de fonctionnement optimales conduit à l'amélioration des conditions opératoires. Avec les réponses optimales, parmi les modèles présélectionnés, cela a été fait en utilisant le profil de réponse dont la valeur souhaitée proche de 1 correspond aux valeurs extrêmes de capacité et rendement d'adsorption.

### II.13. Conclusion

Dans cette partie introductive, nous avons montré que la variabilité expérimentale impose que toute étude doit être accompagnée d'une analyse statistique et de son interprétation. Les plans d'expérience ont été utilisés avec succès pour évaluer les différentes réponses à étudier (étalement, écoulement, viscosité, résistance...) et cette méthode permet de résoudre les problèmes d'optimisation et facilite la prévision des résultats avec 8 essais réalisés à deux facteurs avec différents niveaux d'une façon très simple et facile.

**CHAPITRE III**

**Caractérisation des  
matériaux utilisés**

## Chapitre III

### Caractérisation des matériaux utilisés

#### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux locaux utilisés dans l'industrie du béton et les différents essais de caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais et durci. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC.

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 Calcaires
- ❖ 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	0	0	0	100.
2,5	0	0	0	100
1,25	43	43	0.43	99.57
0,63	226	269	26.90	73.10
0,315	447	716	71.60	28.40
0.16	224	940	94.00	6.00
0,08	45	985	98.50	1.5
Fond	15	1000	100	0.00

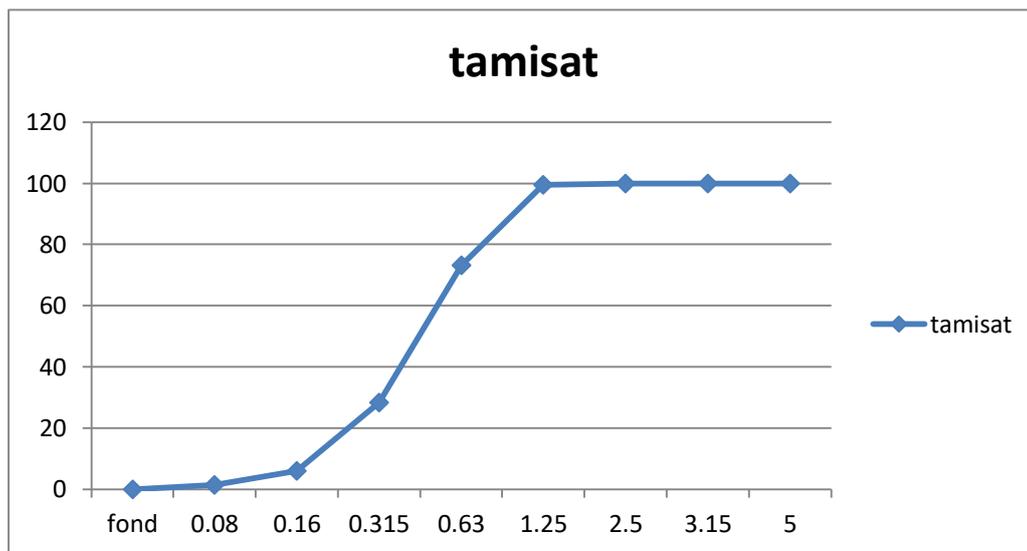


Figure III.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf

On remarque une courbe granulométrique uniforme et bien étalée.

### III.3.1.2. 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

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

Qualité du sable	Module de finesse
Sable gros	>2.5
Sable moyen	$2 < M_f < 2.5$
Sable fin	$1.5 < M_f < 2$
Sable très fin	$1 < M_f < 1.5$

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

$$M = \frac{940 + 716 + 269 + 43}{1000} = 1.96$$

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

### III.3.1.3. 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 (%) $P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100\%$	Compacité (%) $C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	Indice de vides E $E = \frac{P}{C}$
Valeurs moyennes	2.50	1.599	35.75	64.25	0.55



Figure III.2. Masses volumique apparente et absolue du sable

#### III.3.1.4. Equivalent du sable [NF EN 18-598]

L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propreté d'un sable ou d'un gravier. A partir de cet essai, le sable utilisé est qualifié comme très propre et convient pour le béton.

Les valeurs moyennes trouvées sont. :

$$E.S.V_{moy} = 89 \% \text{ et } E.S.P_{moy} = 86\%$$

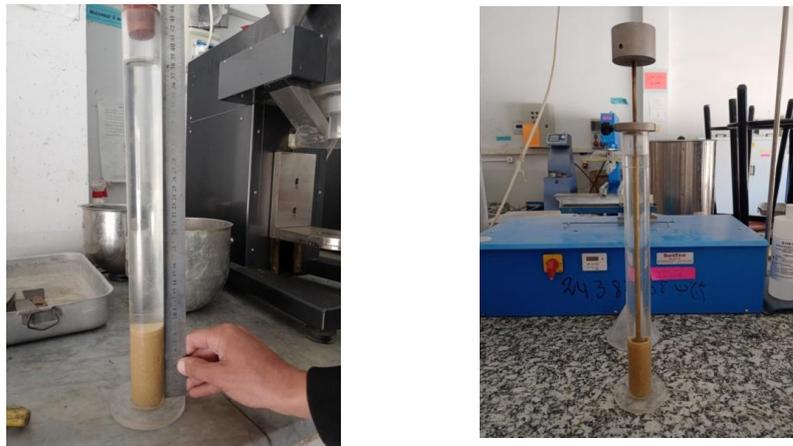


Figure III.3. Essais équivalent de sable

#### III.3.2. Le 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		Refus cumulés (g)				Tamisât (%)	
	(g)		(g)		(%)		(%)	
	3/8	8/16	3/8	8/16	3/8	8/16	3/8	8/16
16	-	261	-	261	-	8.15	-	91.85
12.5	-	1880	-	2141	-	66.90	-	33.10
10	-	577	-	2718	-	86.18	-	13.82
8	10	452	10	3170	0.62	99.06	99.38	0.94
6,3	713	29	723	3199	45.18	99.96	54.82	0.04
5	515	1	1238	3200	77.37	100	22.62	0.00
4	263	-	1501	-	93.81	-	6.19	-
3,15	94	-	1595	-	99.68	-	0.32	-
2,5	5	-	1600	-	100	-	00	-
Fond	0	0	1600	3200	100	100	00.00	0.00

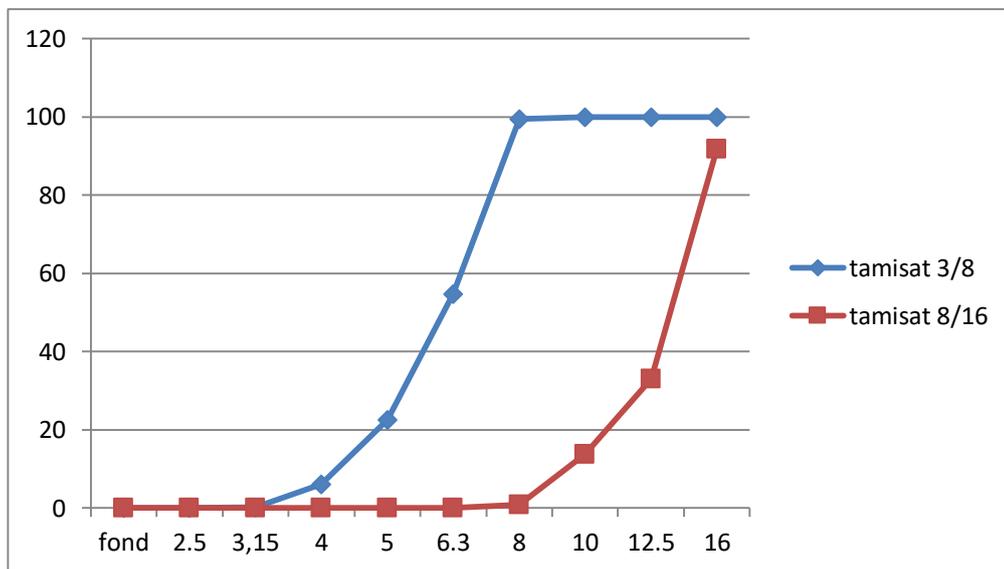


Figure III.4. Courbes granulométriques du gravier 8/16 et 3/8

### III.3.2.2. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés

- *Masses volumiques absolue et apparente [NF EN P18-554], Compacité, porosité et l'indice des vides [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 des graviers utilisés

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 $E = P / C$
Valeurs moyenne du gravier 3/8	2.67	1.38	48.31	51.68	0.93
Valeurs moyenne du gravier 8/16	2.70	1.43	47.03	52.96	0.88



Figure III.5. Essais masse volumique apparent et absolue de gravier

### III.3.2.3. Les caractéristiques mécaniques des graviers

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

#### ➤ Essai Los Angeles [NF EN P18-573]



Figure III.6. Essais de Los Angeles

$$LA = 100 \times (5000 - 3811)/5000 = 23,78$$

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

Coefficient L <sub>A</sub>	Nature de los Angeles L <sub>A</sub>
<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 **dure** se trouve dans l'intervalle des graviers admissibles.

### III.3.3. Le 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.3.3.1. Caractérisation chimique et minéralogique du ciment utilisé (CEM II/B 42.5)

Le tableau ci-après regroupe toutes ces caractéristiques :

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

Oxyde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	So <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
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



Figure III.7. Essai de la masse volumique absolue du ciment

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

Les caractéristiques physiques		Unité	Valeur
Masse volumique absolue		$g/cm^3$	3,18
Consistance normale		%	26-28
La finesse (Blaine)		$cm^3/g$	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.3.4. Les Fillers calcaires

Toutes les caractéristiques sont présentées ci-après

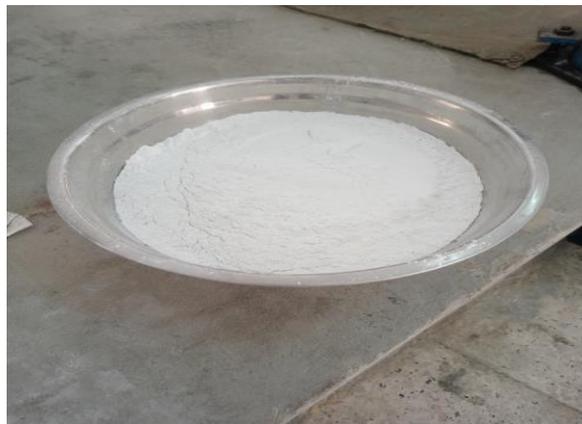


Figure III.8. Fillers calcaires broyés

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	8000	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.3.5. Les adjuvants

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

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 de le 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.3.5.1 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 **figure III.9**.

Pour cette étude la valeur est de 1,9 % de la masse ciment.



Figure. III.9. Détermination du point de saturation au mini cône

### III.3.6. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour les gâchages, est une eau potable disponible au niveau de notre laboratoire de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

## III.4. Formulation du béton auto plaçant par la méthode AFGC

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

### III.4.1. Choix des constituants pour formuler notre BAP

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

#### Les données :

On a choisi deux variantes du rapport G/S : 1 et 0.9.

Donc on aura ainsi deux mélanges témoins (sans remplacement du ciment avec du calcaire) à préparer avec :

constituants	Dosage
<b>Ciment (C)</b>	400 Kg /m <sup>3</sup>
<b>Le rapport eau/liant (E/L)</b>	0.38
<b>Superplastifiant (SP)</b>	1.9% de la masse du ciment

On fait remplacer par la suite à chaque fois le ciment par un pourcentage de fillers calcaires (Ca). On a choisi trois valeurs de substitution : 10, 15 et 20% de la masse du ciment. Donc en tout, on doit préparer 8 mélanges.

### III.4.2. Calcul des composantes des mélanges pour un mètre cube (1000 litres)

On prend, comme exemple de calcul détaillé, le rapport G/S = 1

$$\rightarrow \text{L'eau E} : E/C = 0,38$$

On trouve E=152 kg

$$\rightarrow \text{Le super Plastifiant Sp} : Sp = 1,9\% \times L \text{ d'où } Sp = 1,9\% \times 4000 = 7,60 \text{ Kg}$$

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

$$Esp = 70\% \times 7,60 = 5,32 \text{ kg qu'on doit retrancher de la quantité globale de l'eau.}$$

Donc la quantité d'Eau de gâchage est :  $Eg = E - Esp = 152 - 5,32$ , on trouve  $Eg = 146,68 \ell$

$\rightarrow$  Détermination du volume des granulats  $V_{granulats}$  :

Sachant que le volume total unitaire est :  $V_{total} = V_{p\hat{a}te} + V_{granulats} + V_{air}$  ;

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

$$V_{air} = 25 \ell.$$

$\rightarrow$  Calcul du volume de la pâte  $V_p$  :

$$V_p = \frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_E}{\rho_E} + \frac{M_{SP}}{\rho_{SP}}$$

M représente la masse et  $\rho$  la masse volumique absolue.

$$V_p = 400/3,18 + 146,68/1 + 7,6/1,07 = 283,7 \text{ L}$$

Donc le volume des granulats sera :  $V_{granulats} = V_{total} - (V_{p\hat{a}te} + V_{air})$

$$V_{granulats} = 1000 - (283,71 + 25) \text{ d'où } V_{granulats} = 691,29 \ell$$

Cette valeur représente la somme des volumes des graviers  $V_g$  et du sable  $V_s$

$$V_g + V_s = 691,29 \text{ Vgr} = V_s \rightarrow V_s = 691,29 / 2 = 345,64 \text{ L avec } \rho_s = 2,5 \text{ Kg}/\ell ;$$

Ainsi sa masse est de **864.10 Kg.**

$$V_g(3/8) = V_g \times 40\% = 345,64 \times 40\% \text{ qui vaut } 138,35 \ell, \text{ avec } \rho_{g3/8} = 2,67 \text{ Kg}/\ell ;$$

Alors **M=369,39 Kg ;**

$V_{gr} (8/16) = V_g \times 60\% = 345,64 \times 60\%$  qui vaut 207,38ℓ avec  $\rho_{g8/16}=2,70 \text{ Kg/m}^3$  ;

Alors **M=559,92 Kg.**

On refait le calcul pour le rapport G/S= 0.9 et puis faire l'équivalent pour 36 L.

Les dosages exprimés en masses sont récapitulés dans les tableaux **III.11. et III.12**

**Clarification :**

Les symboles **BAP<sub>i-j</sub>**, présentés dans les tableaux III.11 et III.12 ainsi qu'au chapitre IV, signifient:

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

Pour i=2, c'est un BAP avec le rapport G/S=0.9.

L'indice **j** représente le pourcentage des fillers calcaires (10%, 15% et 20%)

**Tableau III.11. Formulation des BAP de rapport G/S=1 par la méthode LCPC**

Constituants	Quantité des BAP <sub>i-j</sub> en Kg							
	BAP <sub>1-0</sub>		BAP <sub>1-10</sub>		BAP <sub>1-15</sub>		BAP <sub>1-20</sub>	
	0% f calcaire		10% f calcaire		15% f calcaire		20% f calcaire	
	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ
Ciment	400	14 4,	360	12,96	340	12,24	320	11,52
Gravier 3/8	369,39	13,29	369,39	13,29	369,39	13,29	369,39	13,29
Gravier 8/16	559,92	20,15	559,92	20,15	559,92	20,15	559,92	20,15
Sable	864,10	31,10	864,10	31,10	864,10	31,10	864,10	31,10
Eau	146,68	5,28	146,68	5,28	146,68	5,28	146,68	5,28
Super plastifiant	7,60	0,283	7,60	0,283	7,60	0,283	7,60	0,283
filler de calcaire	00	00	40	1,44	60	2,16	80	2,88

Tableau III.12. Formulation des BAP de rapport G/S=0.9 par la méthode LCPC

Constituants	Quantité des BAP <sub>i,j</sub> en Kg							
	BAP <sub>2-0</sub>		BAP <sub>2-10</sub>		BAP <sub>2-15</sub>		BAP <sub>2-20</sub>	
	0% f calcaire		10% f calcaire		15% f calcaire		20% f calcaire	
	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ	1 m <sup>3</sup>	36 ℓ
<b>Ciment</b>	400	14.4	360	12.96	360	12.24	320	11.54
Gravier 3/8	349.71	12.58	349.71	12.58	349.71	12.58	349.71	12.58
Gravier 8/16	530.46	19.09	530.46	19.09	530.46	19.09	530.46	19.09
Sable	909.59	32.74	909.59	32.74	909.59	32.74	909.59	32.74
Eau	146.68	5.28	146.68	5.28	146.68	5.28	146.68	5.28
Super plastifiant	7.60	0.283	7.60	0.283	7.60	0.283	7.60	0.283
filler de calcaire	00	00	40	1.44	60	2.16	80	2.88

### III.5. Procédures de fabrication des mélanges en BAP

Tous nos essais sont effectués au niveau du laboratoire de génie civil à l'université Mohamed el Bachir el Ibrahim. 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 doit suivre le mode opératoire suivant :

- Préparer et peser tous les constituants ;
- Malaxer à sec tous les matériaux secs (gravier, sable, ciment, filler de calcaire) pendant 1,30min ;
- Introduire le superplastifiant, après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée, puis le reste de la dose d'eau en malaxant pendant 3 minutes ;

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

- Après l'arrêt de malaxage, effectuer les essais immédiatement (l'étalement, l'écoulement, stabilité au tamis et le rhéomètre).
- Graisser les moules pour faciliter le décoffrage.

### III.6. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état frais

#### III.6.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams : [NF EN 12 350-8]

L'essai de l'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement réalisé au cône d'Abrams, (figure III.10). Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP.

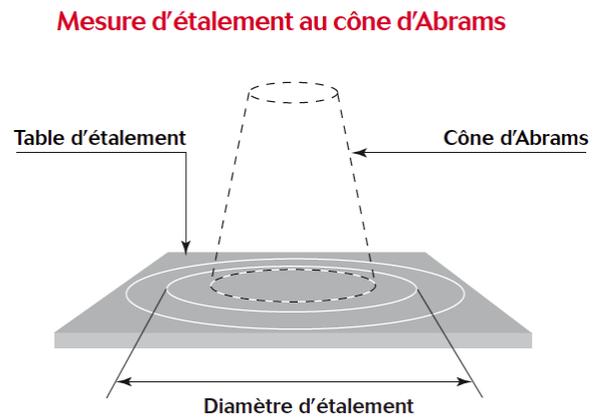


Figure III.10. L'essai d'étalement (laboratoire de génie civil).

### III.6.2. L'essai de la boîte en L : [NF EN 12 350-10]

La boîte en L permet de tester la mobilité du 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.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte en forme de L, puis en levant une trappe (séparant les parties verticale et horizontale de la boîte) de laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures de diamètre 12 mm (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale (H1 côté trappe) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

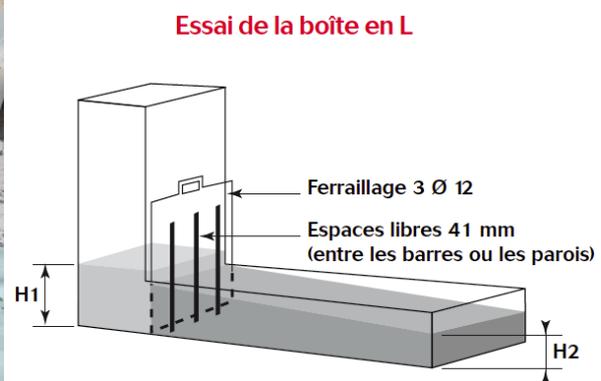


Figure III.11. L'essai de la boîte en L (laboratoire de GC).

### III.6.3. 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. Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

Le pourcentage en masse de laitance passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial, exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %. Plus il est faible, plus le béton est stable. Au-delà de 20 %, le béton présente un risque de ségrégation.

Cet essai permet l'optimisation d'une formulation de BAP.

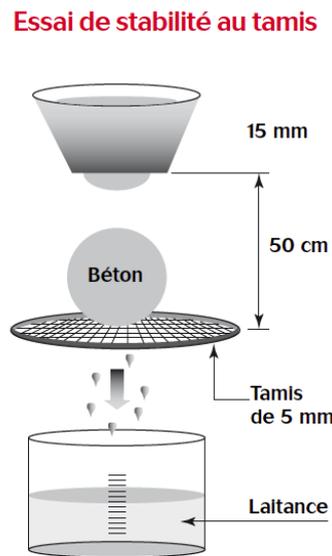


Figure III.12. L'essai stabilité au tamis (laboratoire GC).

### III.6.4. Essai de 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

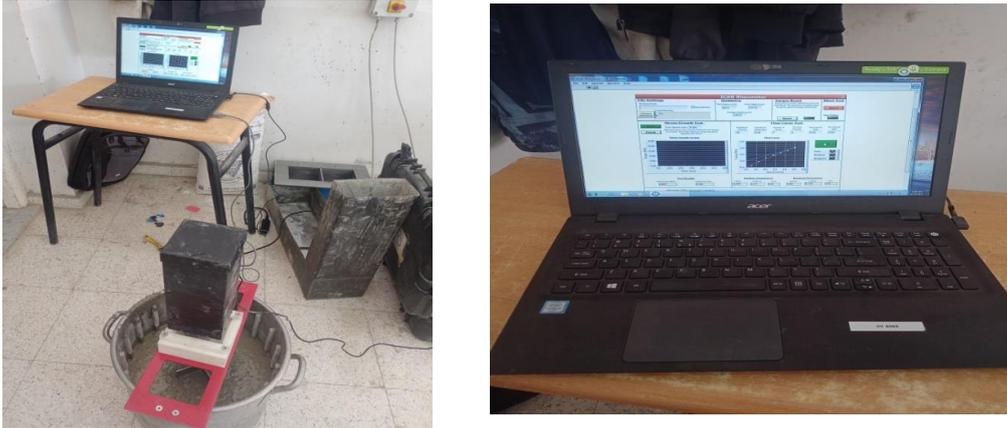


Figure. III.14. Essai rhéomètre (laboratoire GC).

### III.6.5. Confection des éprouvettes

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme : Prismatique (7×7×28), cubique (10x10x10 cm), et cylindrique (16x32cm).

### III.6.6. 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.15. Bac de conservation des éprouvettes (laboratoire GC)

## III.7. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état durci

### III.7.1. Les essais destructifs

#### ➤ La résistance à la compression

La résistance à la compression, exprimée en **MPa**, 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.



Figure III.16. L'essai de compression (au laboratoire GC)

➤ **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 prismatique (7x7x28) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.



Figure III.17. L'essai de la résistance à la traction par flexion (laboratoire GC)

### III.7.2. Les essais non destructifs

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir : la résistance, l'homogénéité, la porosité la durabilité ...

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

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation de l'onde sonore traversant le béton est après on calcule la vitesse. Plus la vitesse est grande plus le béton est bien performant.



*Figure III.18. 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.19. L'essai de scléromètre (laboratoire GC)*

### **III.8. Conclusion**

Il est nécessaire de respecter les normes des essais de caractérisation des différents constituants d'un béton autoplaçant afin d'aboutir à la meilleure formulation vis à vis la performance à l'état frais comme à l'état 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 des essais effectués au chapitre III, vont être traités dans ce qui suit. En effet, et à partir des mélanges obtenus, on doit procéder à l'analyse des résultats des différents essais afin de caractériser les BAPs confectionnés.

Nos mélanges sont identifiés comme suit : **BAP**  $i;j$

Avec :

$i=1$  pour un rapport G/S= 1 et  $i=2$  pour un rapport G/S=0.9 ;

$j=10$  ou 15 ou 20 selon le pourcentage d'addition des fillers calcaires.

##### **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 (kg/l)
BAP <sub>1-0</sub>	66	4.24	92	2.232
BAP <sub>1-10</sub>	65	5.12	90	2.225
BAP <sub>1-15</sub>	66	4.26	96	2.367
BAP <sub>1-20</sub>	65	3.77	88	2.199
BAP <sub>2-0</sub>	67	4.76	94	2.275
BAP <sub>2-10</sub>	68	4.61	92	2.243
BAP <sub>2-15</sub>	70	6.18	94	2.357
BAP <sub>2-20</sub>	63	2.64	85	2.137

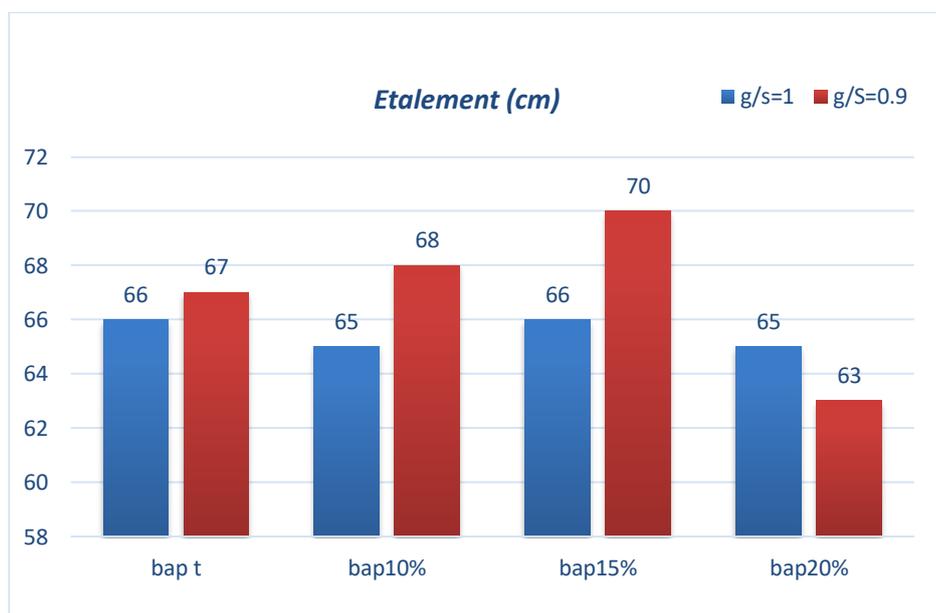
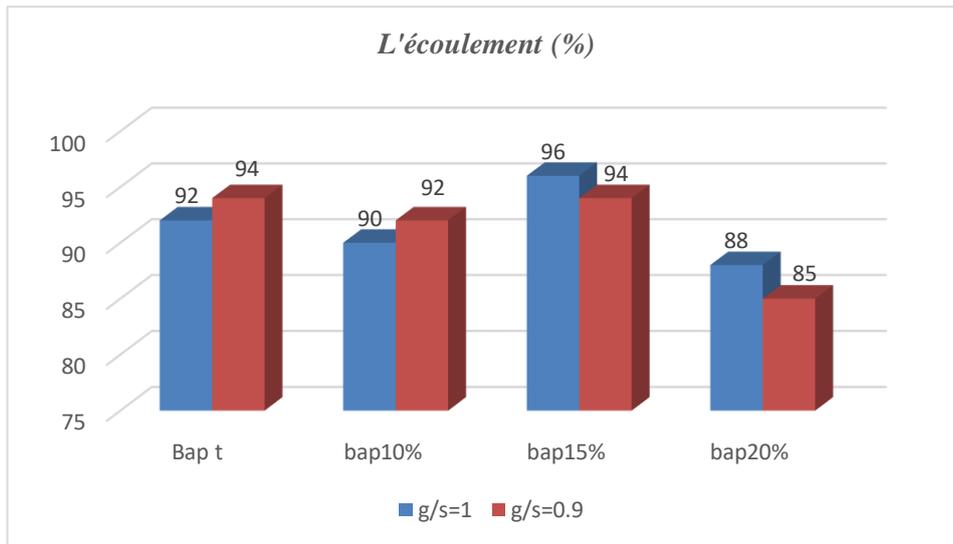
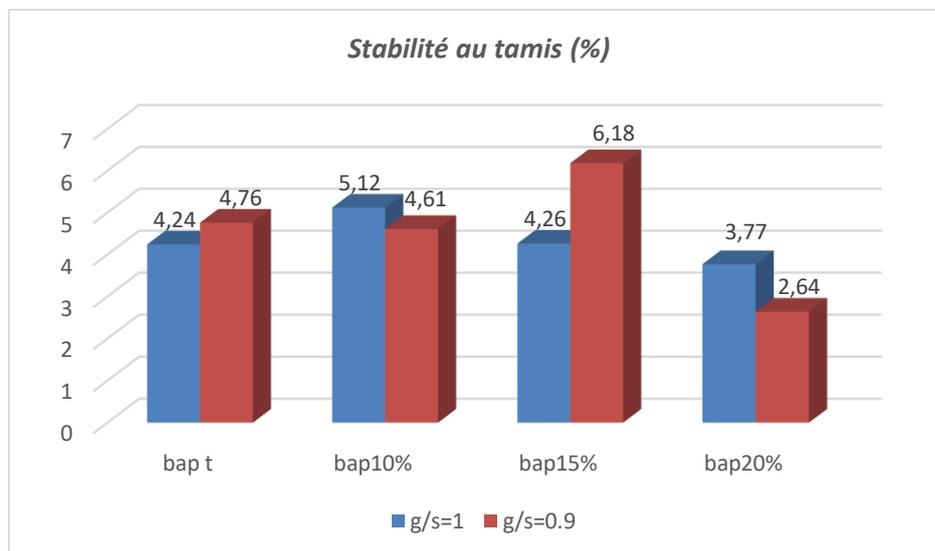


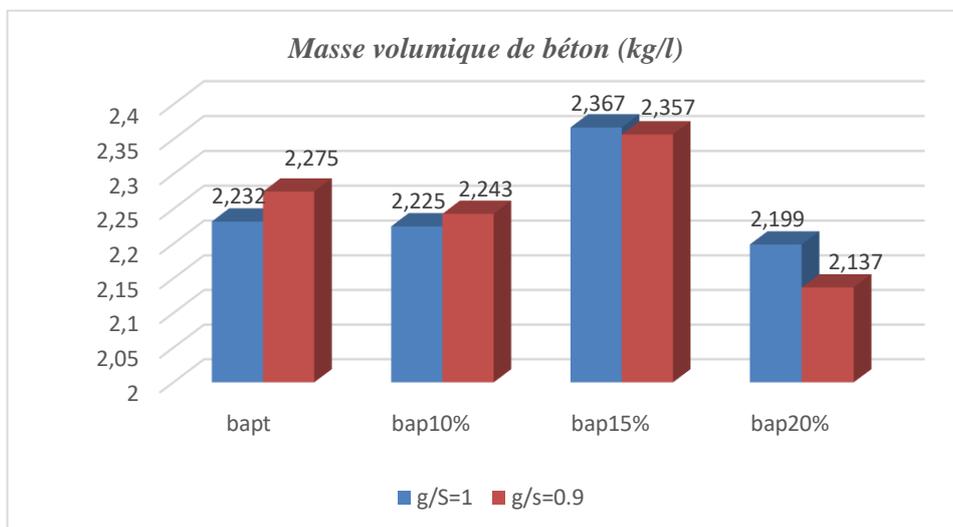
Figure.IV.1. Résultats de l'essai d'étalement



**Figure IV.2. Résultats de l'essai d'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 autoplaçants 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 pour la majorité des mélanges et pratiquement très faible (de 1 à 2 mm) pour d'autres. De plus les gros granulats ont 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 63 et 70 cm et qui sont associées aux mélanges BAP<sub>2-20</sub> et BAP<sub>2-15</sub>.

Les résultats d'essai pour la boîte en L présentés dans le tableau IV.1 montrent clairement que les bétons présentent des rapports satisfaisant compris entre 85 à 96 (toutes les valeurs sont supérieures à 80%). Quant aux résultats de stabilité au tamis, tous les BAP ont un taux de ségrégation (laitance) inférieur à 15 % ce qui exprime une bonne stabilité.

L'ajout de 10% et 15% de filler calcaire améliore toutes les caractéristiques à l'état frais et donne les meilleurs résultats d'étalement et d'écoulement.

L'ajout de 20% de calcaire diminue l'étalement et l'écoulement et donne une meilleure stabilité au tamis avec une densité qui diminue jusqu'à 2.137.

Le changement du rapport G/S permet d'améliorer les caractéristiques fraîches. On conclut que plus le G/S est inférieur plus l'étalement et l'écoulement augmentent (pour g/s = 1 et 0.9).

### ***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 où des diagrammes de vitesse-couple seront affichés (on cite comme exemples le **BAP<sub>1-0</sub>** et **BAP<sub>1-10</sub>** illustrés dans la figure IV.6).

**Tableau IV.2** *Caractéristiques rhéologiques des différents BAP mesurés par rhéomètre*

Type de béton	Seuil de cisaillement (Pa)	La viscosité (Pa.s)
BAP <sub>1-0</sub>	0.091	34.950
BAP <sub>1-10</sub>	0.091	41.251
BAP <sub>1-15</sub>	0.091	71.782
BAP <sub>1-20</sub>	0.091	64.595
BAP <sub>2-0</sub>	0.091	38,413
BAP <sub>2-10</sub>	0.091	48.761
BAP <sub>2-15</sub>	0.091	86,645
BAP <sub>2-20</sub>	0.091	85.149

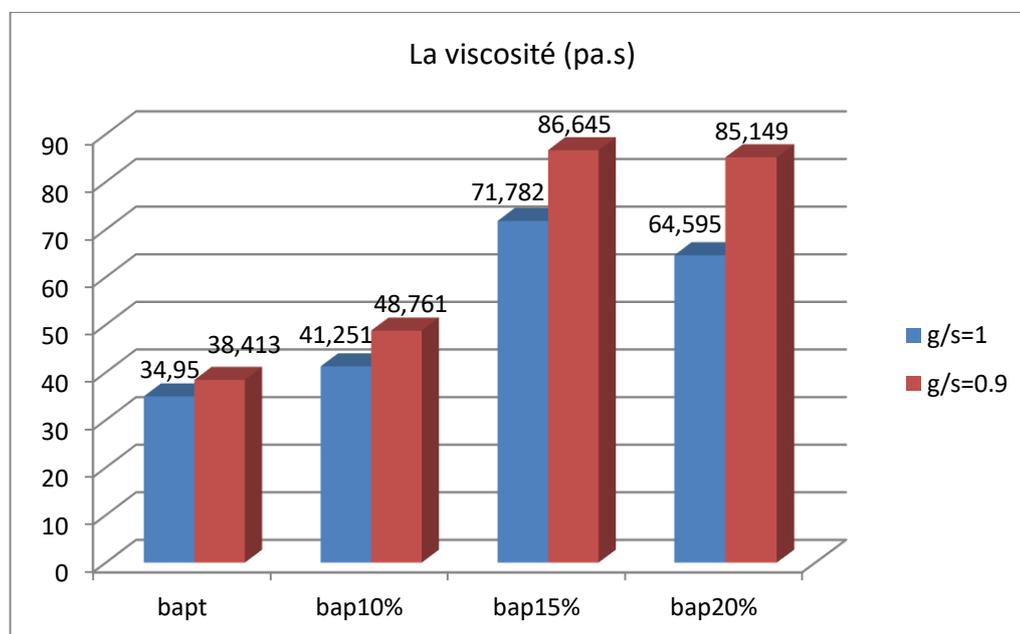
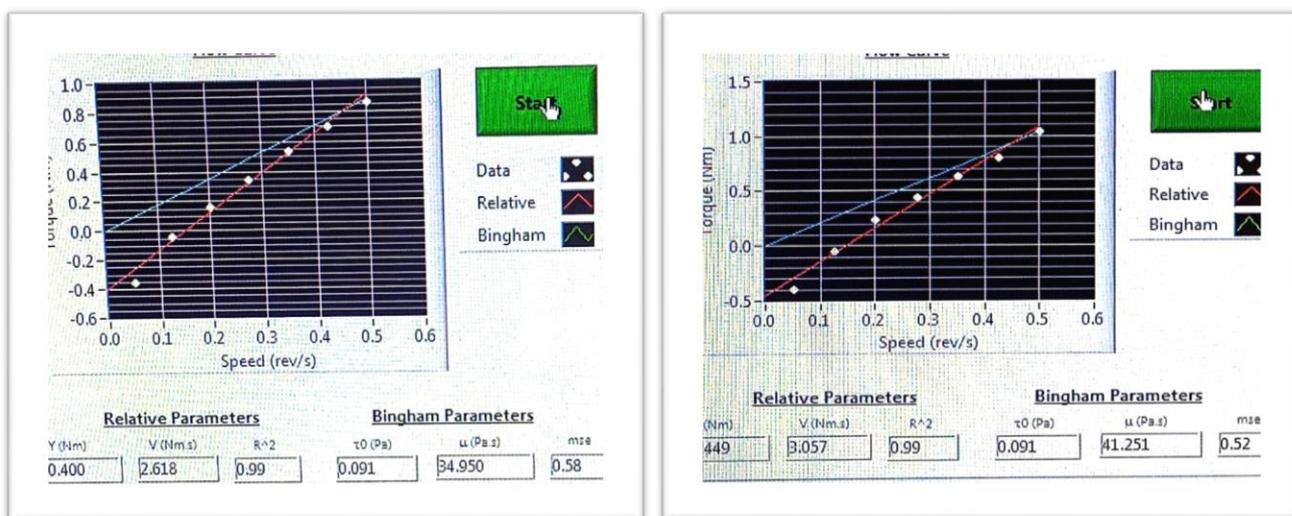


Figure IV.5. Les variations de la viscosité des différents BAP formulés



**BAP<sub>1-0</sub> μ= 34.950 Pa.s**

**BAP<sub>1-10</sub> μ=41.413 Pa.s**

Figure IV.6. Exemples de Diagrammes de vitesse-couple (Speed-Torque)

**Commentaires :**

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

Les valeurs de viscosité varient entre 34.950 Pa.s pour le mélange BAP<sub>1-0</sub> et 86.645 Pa.s pour le BAP<sub>2-15</sub>.

On peut conclure que les mélanges étaient suffisamment fluides pour avoir une viscosité aussi bonne. La nature de filler calcaire 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.

L'ajout de filler calcaire fait augmenter la viscosité et donne une viscosité plus élevée par rapport aux béton témoins (sans ajout).

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.3 présente les valeurs moyennes de la résistance à la compression, à différents âges pour les huit bétons.

Tableau IV.3. 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>	40.120	40.328	45.119	45.407	47.400	48.403
	40.240		44.804		48.309	
	40.625		46.300		49.500	
BAP <sub>1-10</sub>	41.133	40.950	42.050	41.920	44.759	44.605
	41.622		42.210		44.944	
	40.112		41.500		44.112	
BAP <sub>1-15</sub>	41.373	42.050	43.400	43.632	45.756	46.666
	41.036		43.880		47.544	
	43.072		43.616		46.682	
BAP <sub>1-20</sub>	31.570	31.421	32.500	33.967	35.649	35.610
	31.550		34.687		35.632	
	31.144		34.715		35.555	
BAP <sub>2-0</sub>	38.931	38.304	44.100	44.308	46.742	46.463
	38.570		44.610		46.138	
	38.425		44.215		46.520	
BAP <sub>2-10</sub>	44.969	44.294	46.533	45.835	47.641	47.758
	43.898		44.323		48.204	
	44.016		46.651		47.429	
BAP <sub>2-15</sub>	35.732	35.771	36.340	37.620	46.531	47,57
	35.140		38.460		48.622	
	36.441		38.062		47.556	
BAP <sub>2-20</sub>	25.630	25.687	28.330	29.225	36.76	37.87
	24.580		30.575		35.34	
	26.852		28.770		41.51	

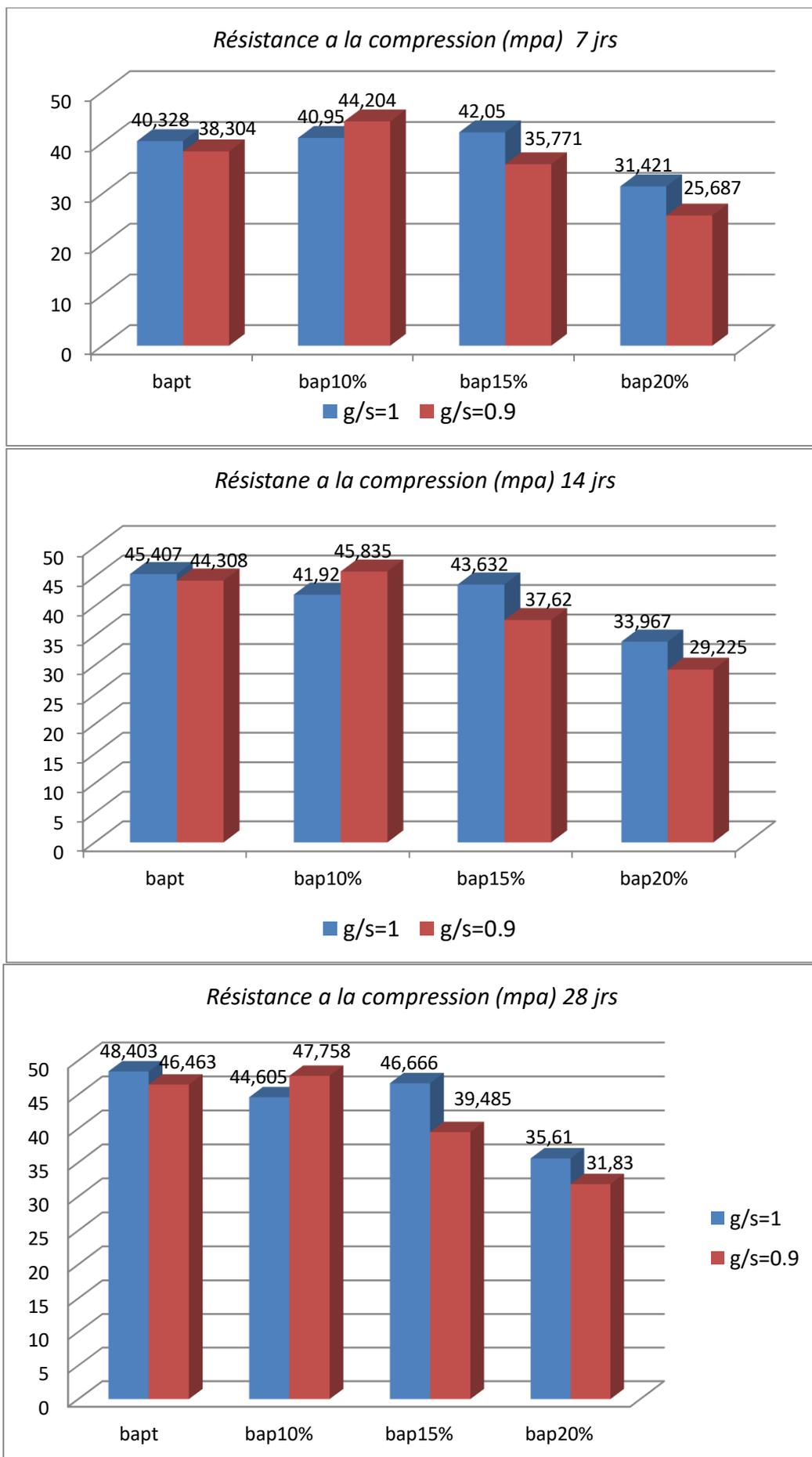


Figure IV.7. Résistance à la compression des BAPs à 7, 14 et 28 jours.

**Commentaires :**

- Les BAP à base de 10% et 15% donne presque les mêmes résistances que le BAP sans ajout ;
- On peut noter que les résistances à la compression ne sont pas très différentes et sont comprises entre 44 et 48 Mpa à l'exception des BAP à base de 20% de filler de calcaire où on marque une chute remarquable de la résistance de l'ordre de 25%.
- L'ajout de 10% et 15% de filler calcaire donne une très bonne résistance à jeune âge par rapport des bétons sans ajout
- En général le rapport G/S= 1 donne une résistance mieux que G/S = 0.9
- Le BAP<sub>1-0</sub> donne 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 <sub>1-0</sub>	5.542	5.820	6.019
BAP <sub>1-10</sub>	4.480	4.896	6.671
BAP <sub>1-15</sub>	5.960	5.424	6.055
BAP <sub>1-20</sub>	4.180	4.651	5.333
BAP <sub>2-0</sub>	5.066	5.675	6.300
BAP <sub>2-10</sub>	4.320	5.865	6.316
BAP 2-15	4.760	4.580	5.046
BAP <sub>2-20</sub>	4.110	4.390	5.131

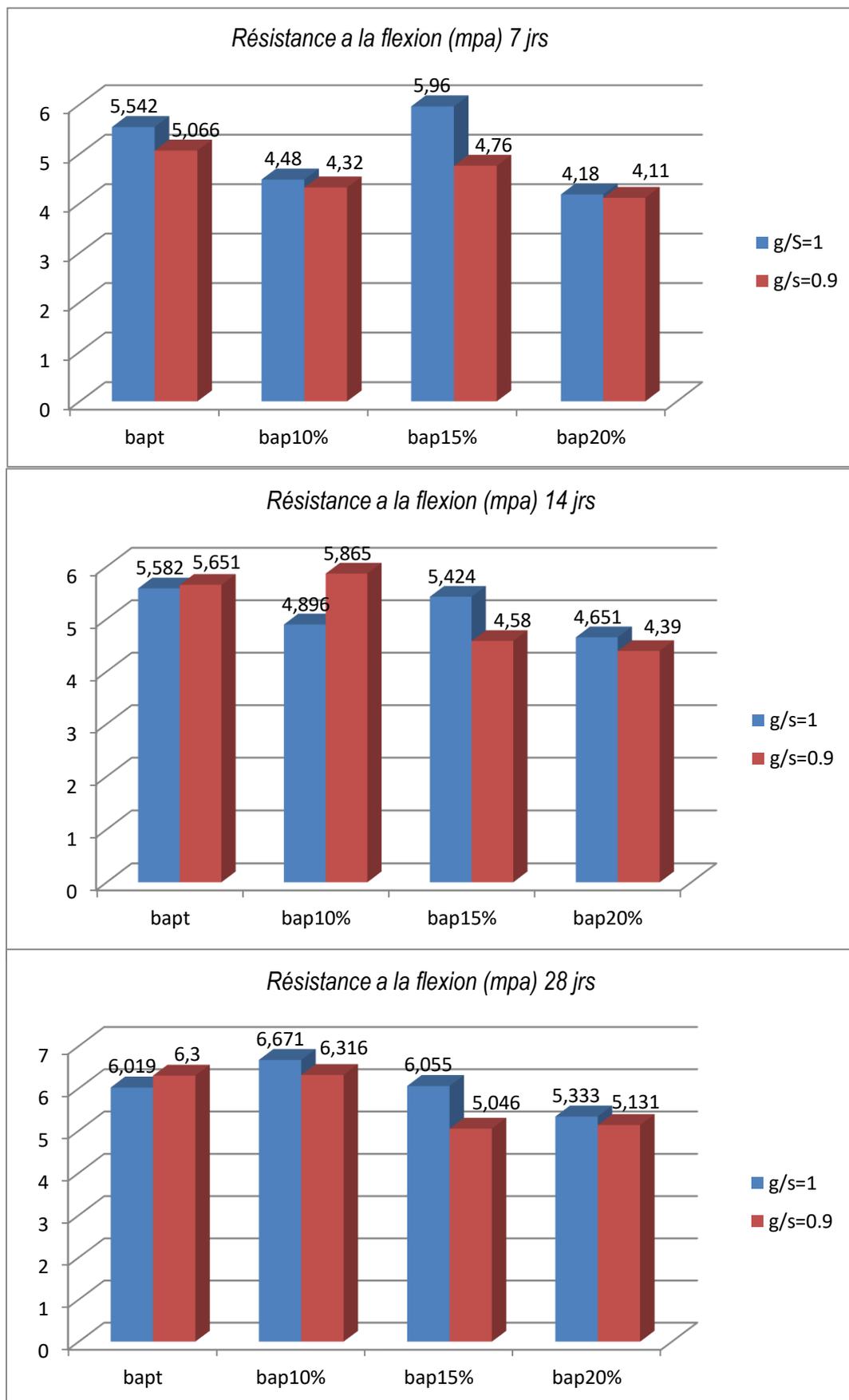


Figure. IV.8. Histogrammes des résistances à la flexion des différents âges de BAP

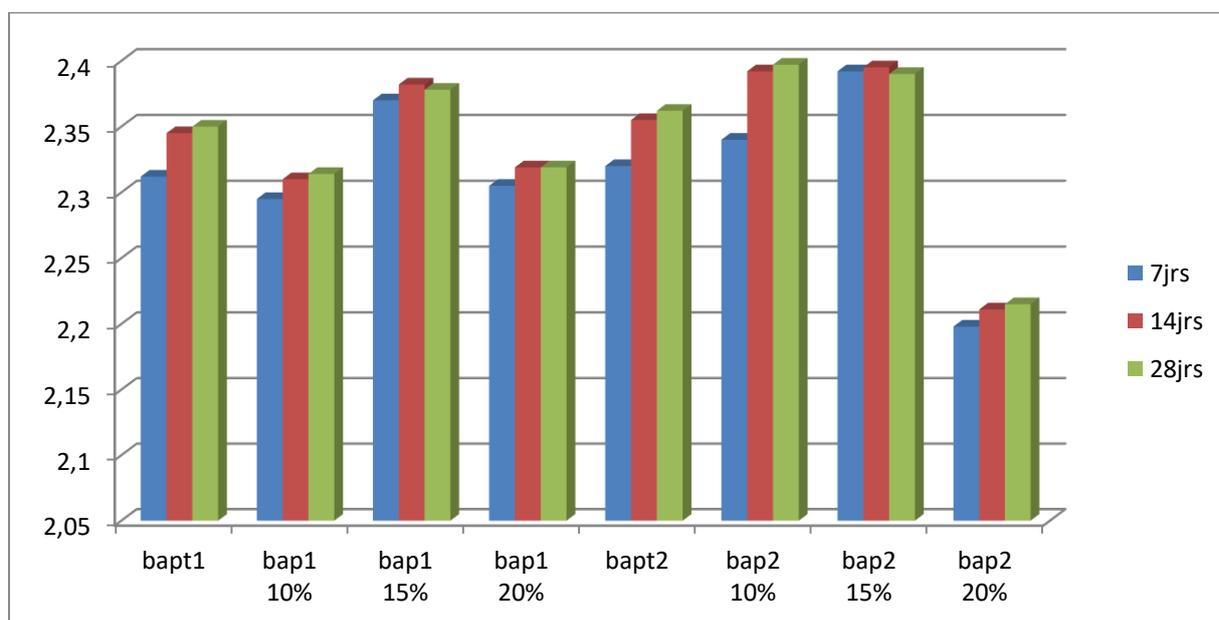
**Commentaires :**

Il est remarquable que nos BAP donnent de très bon résultats, avec des résistances proches pour tous les mélanges. Alors l'utilisation de filler calcaire est bénéfique pour les bétons autoplaçants vis à vis la flexion.

**IV.3.2. Variation de densité à l'état durci**

**Tableau.IV.4. La variation de densité des BAP à 7, 14 et 28 jrs**

Type de béton	Densité		
	7jrs	14jrs	28jrs
BAP 1-0	2.312	2.345	2.350
BAP1-10	2.295	2.310	2.314
BAP1-15	2.370	2.382	2.378
BAP1-20	2.305	2.319	2.319
BAP2-0	2.320	2.355	2.362
BAP2-10	2.340	2.392	2.397
BAP2-15	2.392	2.395	2.390
BAP2-20	2.198	2.211	2.215



**Figure. IV.9. Histogrammes de variation de densité des BAP à 7,14 et 28 jrs**

**Commentaires :**

On remarque l'augmentations de la densité avec le temps, tous les mélanges donnent des résultats maximaux à 28 jours.

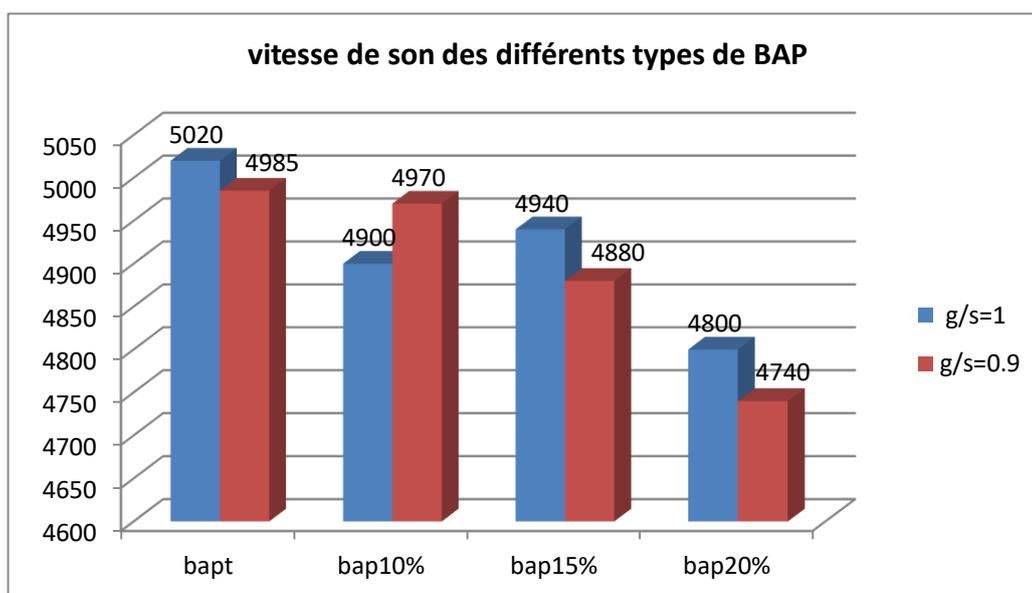
**IV.3.3. Les essais non destructifs**

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.

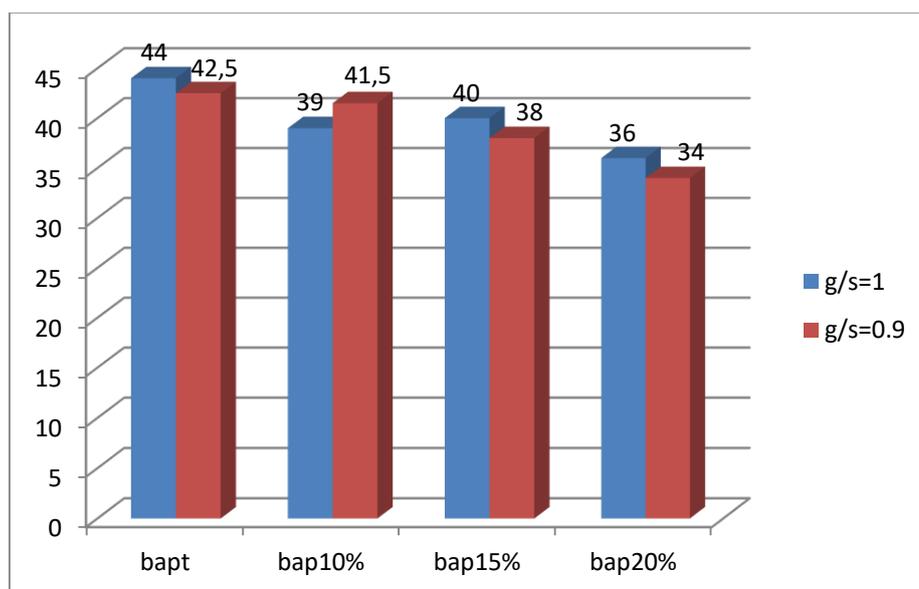
Le tableau ci-après récapitule les résultats trouvés qui seront représentés par des histogrammes

**Tableau IV.5. la vitesse de propagation des ultras son 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>	5020	44
BAP <sub>1-10</sub>	4900	39
BAP <sub>1-15</sub>	4940	40
BAP <sub>1-20</sub>	4800	36
BAP <sub>2-0</sub>	4985	42.5
BAP <sub>2-10</sub>	4970	41.5
BAP <sub>2-15</sub>	4880	38
BAP <sub>2-20</sub>	4740	34



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



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

### **Commentaires :**

Selon les résultats obtenues dans le tableau IV.5 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.

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*

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

➤ L'étalement (ET)

$$67.0857142857143 - 0.75 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 - 0.0742857142857142 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * [(FC - 11.25) * 0.04]$$

➤ Stabilité au tamis (ST)

$$4.856714 - 0.053749 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 - 0.040485 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * [(FC - 11.25) * 0.017]$$

➤ L'écoulement (L)

$$93.785714 + 0.125 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 - 0.214285 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * (FC - 11.25) * 0.134285714285714$$

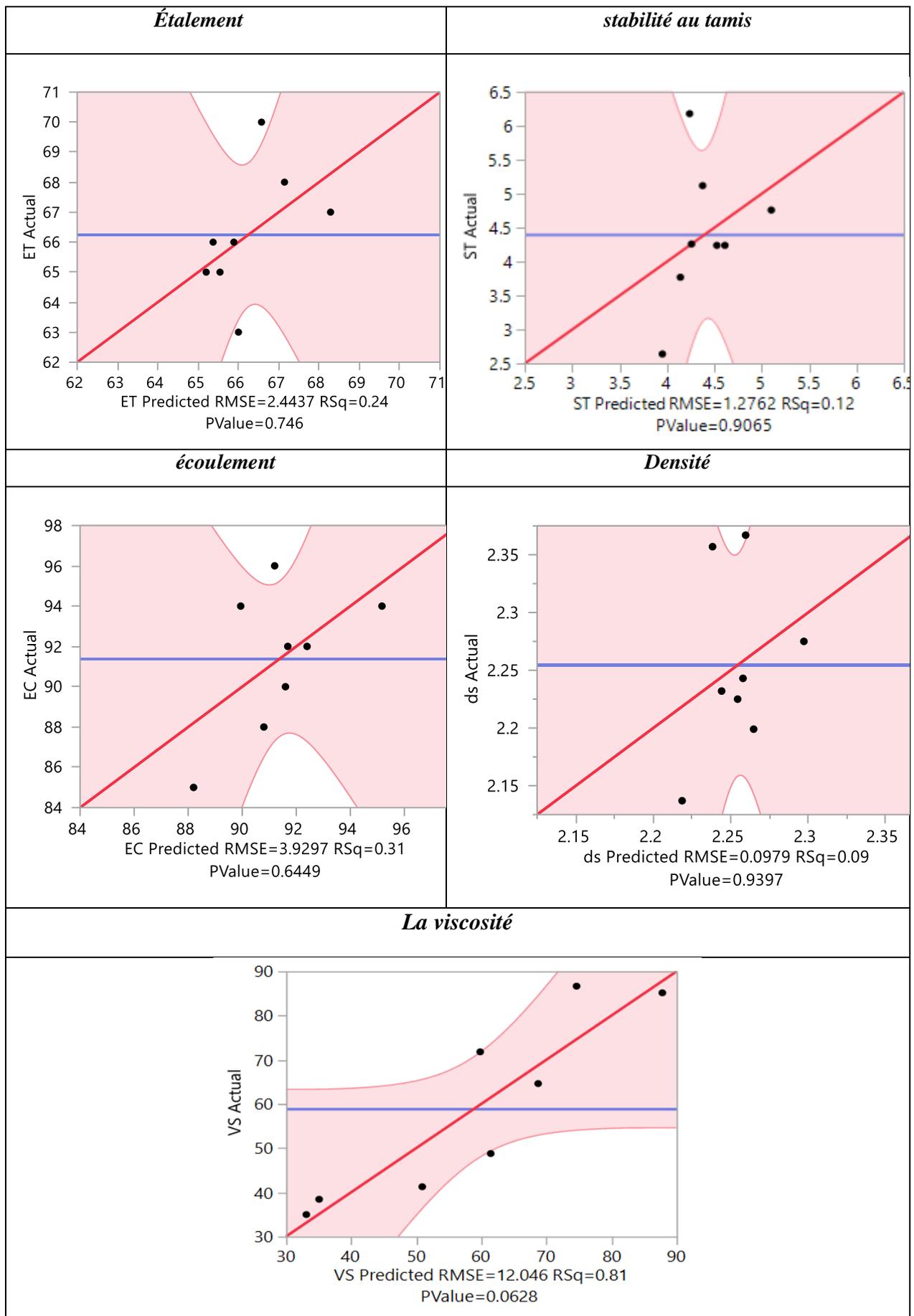
➤ La Viscosité ( $\mu$ )

$$34.090071 - 5.79875 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 + 2.209171 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * (FC - 11.25) * -0.427971428571428$$

➤ La densité

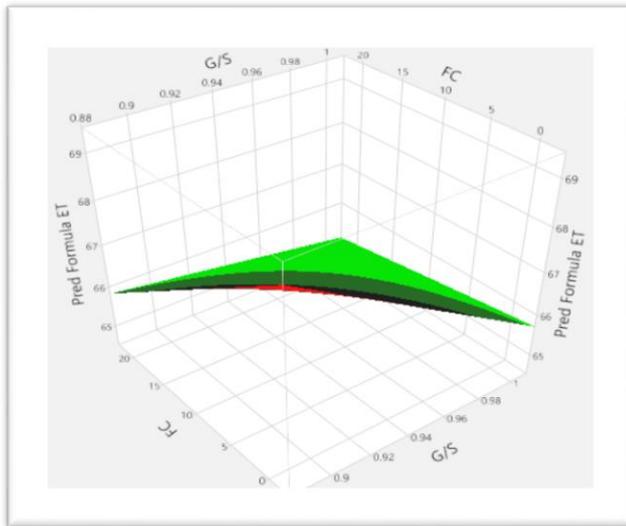
$$2.270671 + 0.001375 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 - 0.001448571 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * ((FC - 11.25) * 0.00248285714285713)$$

a. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

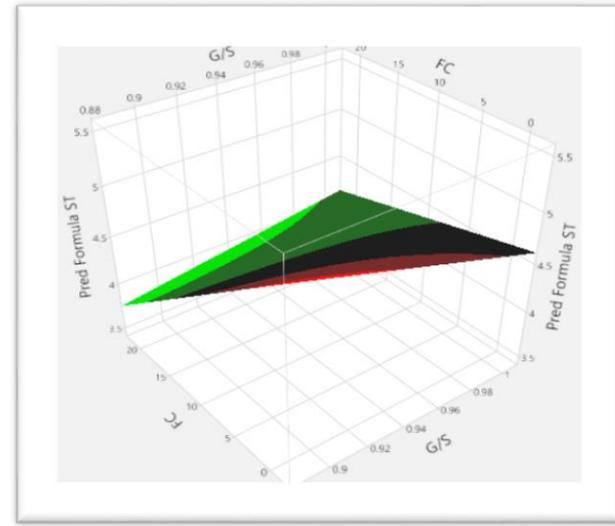


b. Curseur de la grille de réponse

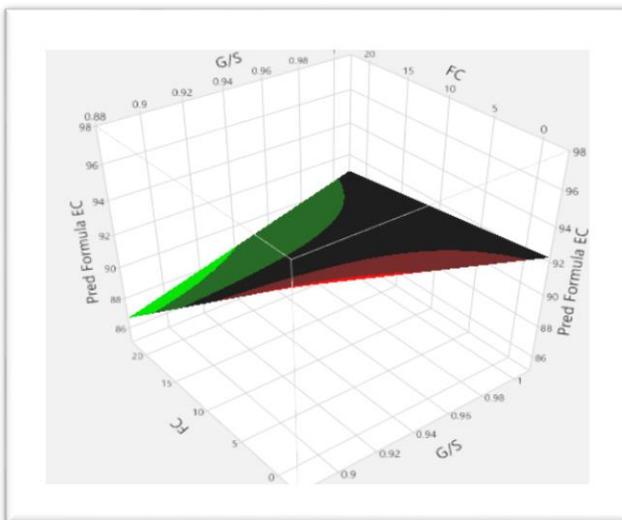
*Etalement*



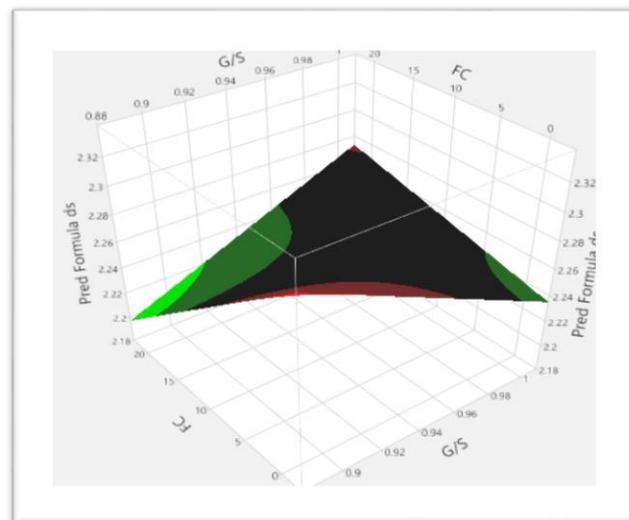
*Stabilité au tamis*



*Ecoulement*



*La densité*



*La viscosité*

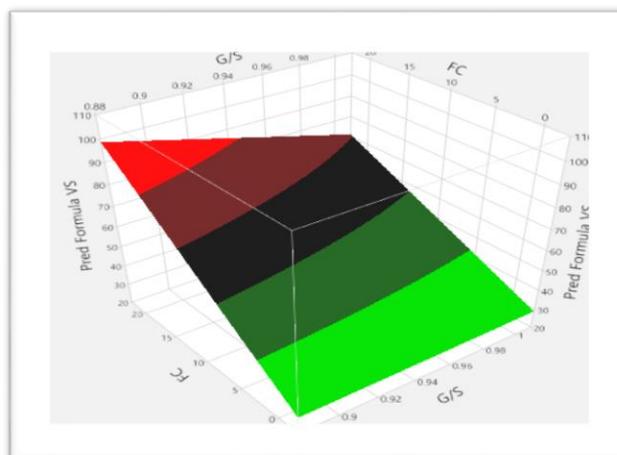


Figure IV.12. Curseur de la grille de réponse des essais à l'état frais

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

$$R_{C7j} = 42.4842571428571 + 1.336625 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 - 0.456322857142857 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * [(FC - 11.25) * 0.126008571428571]$$

$$R_{C14j} = 46.96 + 0.992249999999999 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 - 0.5974 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * [(FC - 11.25) * 0.129297142857143]$$

$$R_{C28j} = 49.6078428571429 + 1.196 * [(G/S) - 0.95] / 0.05 + -0.620697142857143 * FC + [(G/S) - 0.95] / 0.05 * [(FC - 11.25) * 0.100902857142857]$$

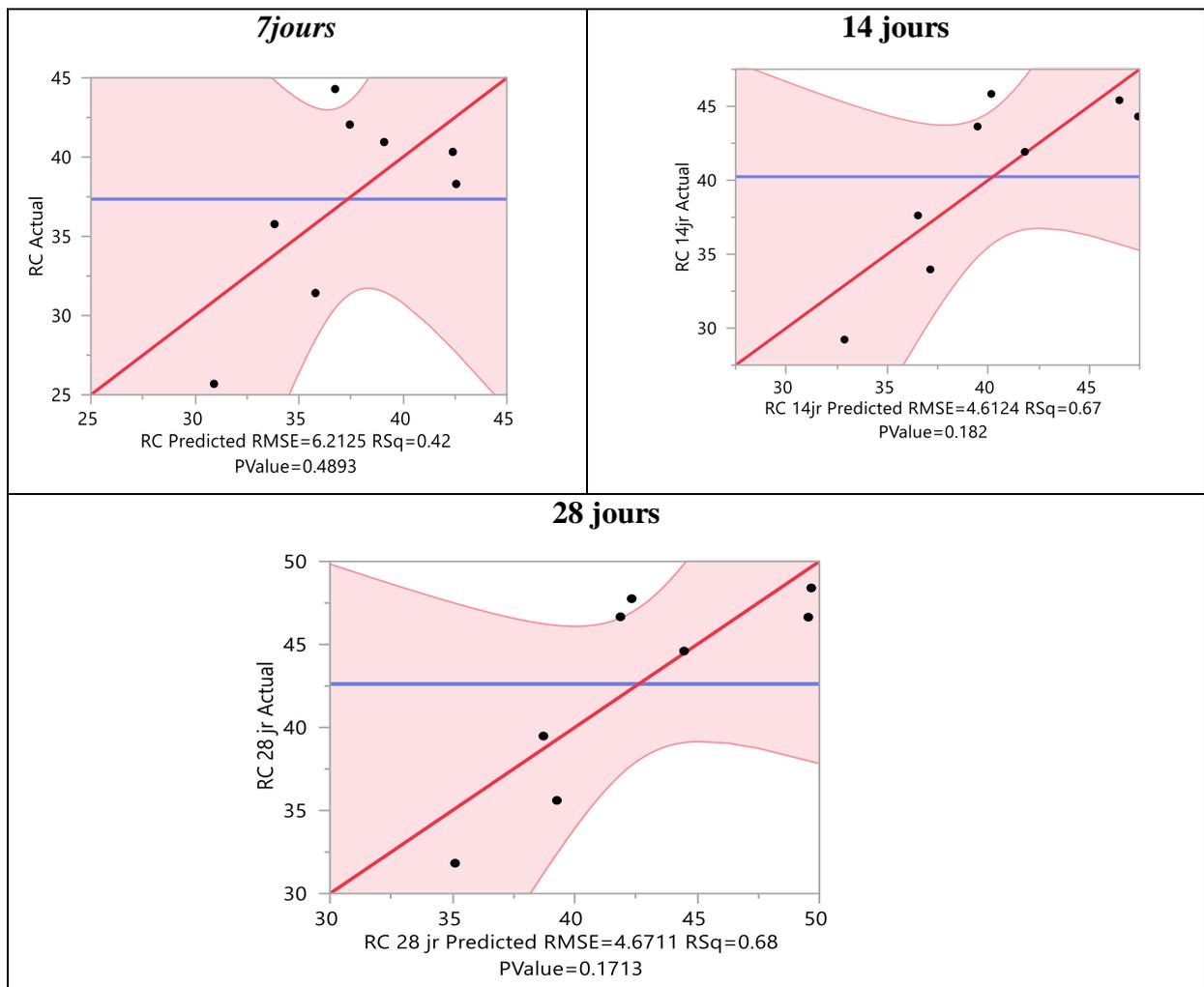
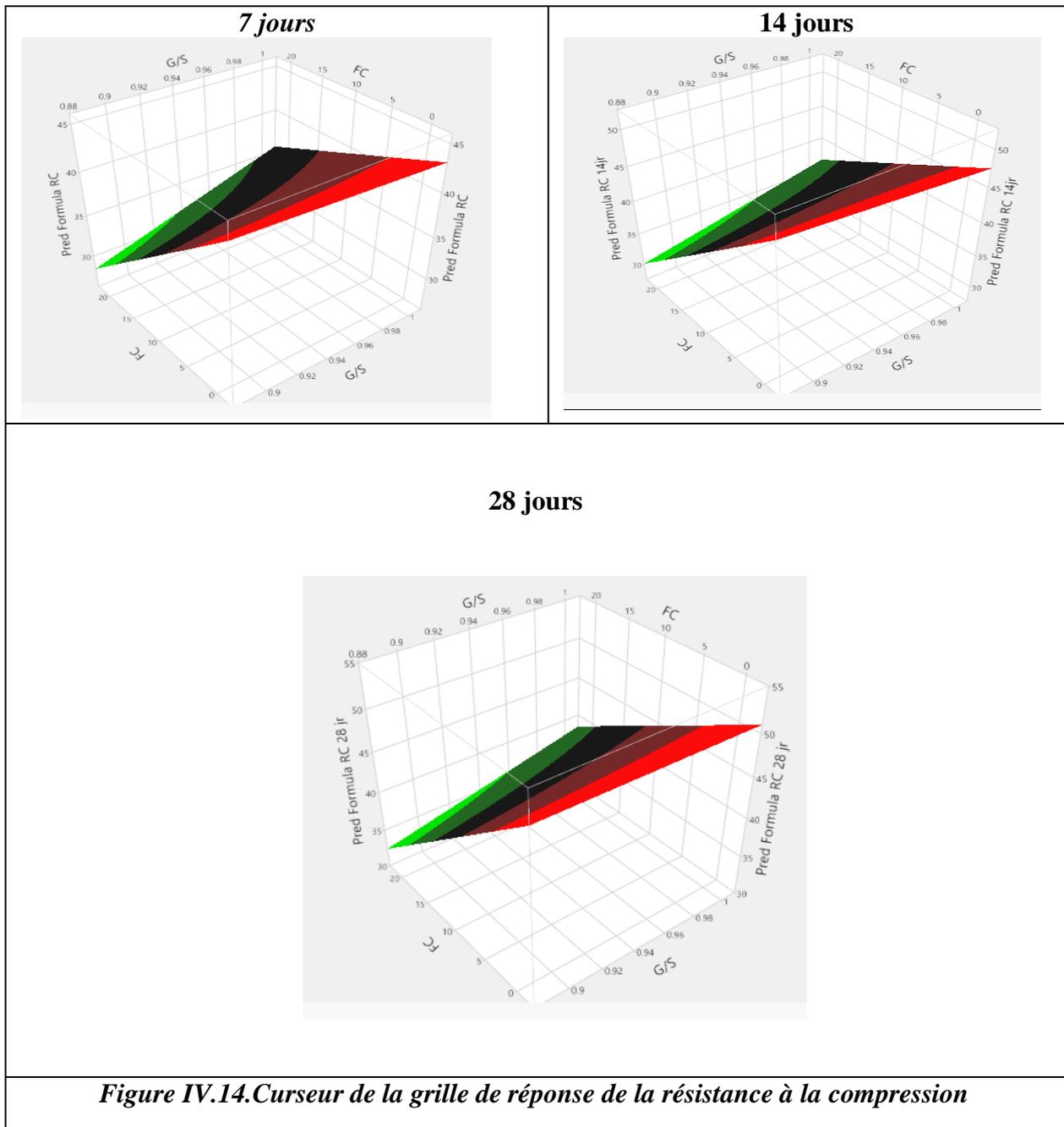


Figure IV.13. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression

a. 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

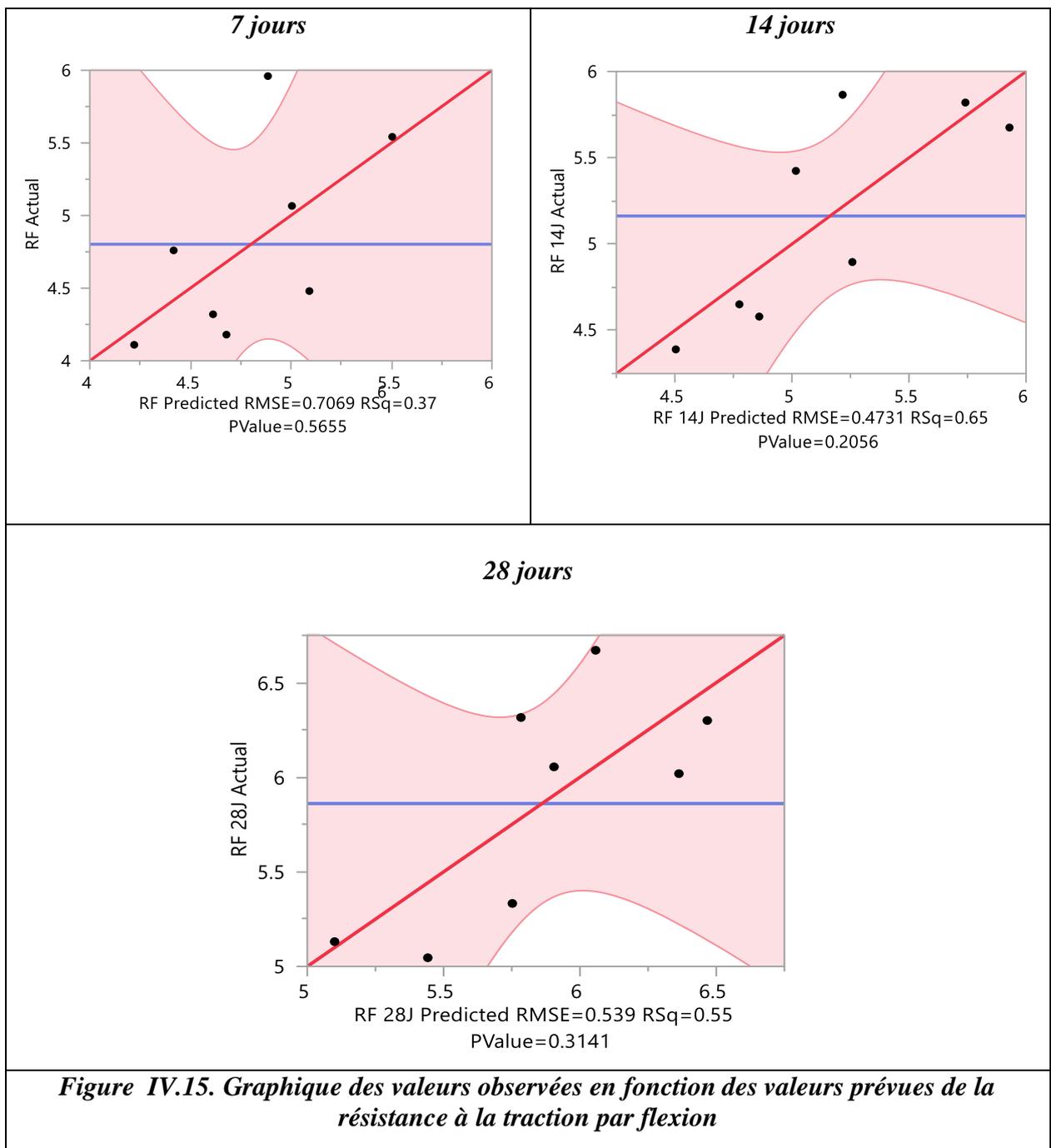
a. Expressions de la prévision

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

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

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

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



c. Curseur de la grille de réponse

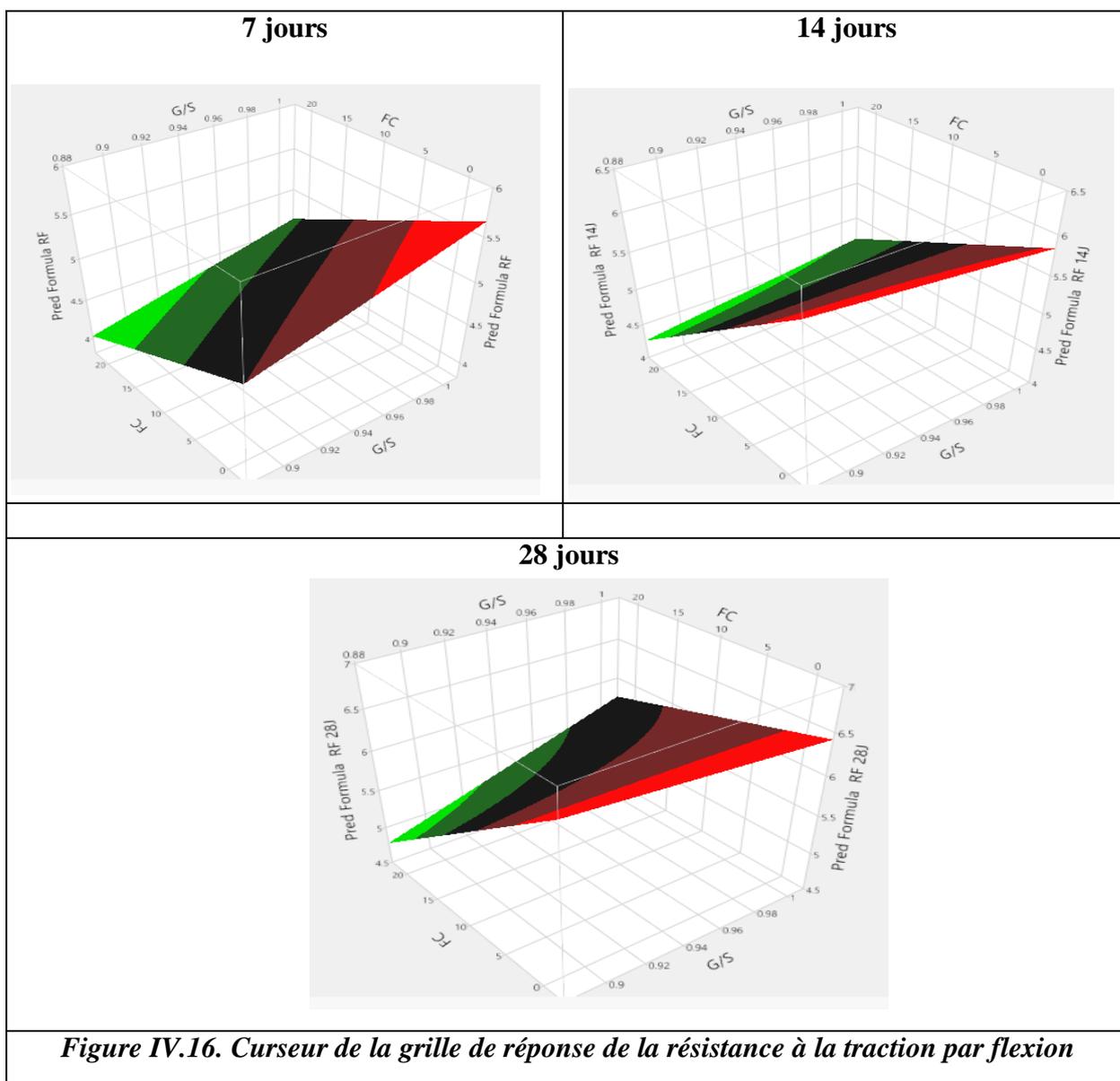


Figure IV.16. Curseur de la grille de réponse de la résistance à la traction par flexion

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) 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 filler de calcaire en remplacement partiel avec le ciment est très bénéfique pour certains dosages inférieurs à 20% 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 le filler de calcaire (FC) avec différents pourcentages de 10, 15 et 20% par remplacement partiel de la masse du ciment, 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 FC est très bénéfique pour certains dosages jusqu'à 20%.

La substitution de 10% et 15% donnent des résultats satisfaisants à l'état frais et à l'état durci ainsi qu'une résistance plus élevée à jeune âge.

L'ajout de 20% de calcaire a fait diminuer l'étalement et l'écoulement et donne des résistances à la compression inférieure à 40 Mpa.

L'ajout de filler calcaire jusqu'à 20% donne des résultats satisfaits pour la résistance à la traction par flexion.

Un rapport G/S inférieur à 1, fait augmenter l'étalement et l'écoulement, par contre un rapport proche de 1, permet d'augmenter la résistance à la compression.

La substitution de filler calcaire augmente la viscosité (de 34 Pa.s sans ajout jusqu'à 86 Pa.s avec l'ajout de 15% de FC )

On affirme que notre formulation donne des très bons résultats de seuil de cisaillement

L'ajout de 20% de calcaire fait diminuer la densité jusqu'à 2.1 ainsi que la densité augmente avec le temps jusqu'à 28 jours

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.

On peut réaliser des BAP avec des meilleures performance à l'état frais ( étalement, écoulement, stabilité au tamis , viscosité ...) et à l'état durci ( résistance à la compression et à la traction par flexion ) avec une substitution de pourcentage de ciment proche de 20% par des fillers de calcaires broyés .

# Liste des références bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1] DOUNANE Nawel, Étude de l'influence de différents types de fillers calcaires sur les performances du béton autoplaçant BAP, mémoire du Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2010.
- [2] T. SEDRAN, Les bétons autonivelants (BAN) synthèse bibliographique, Bulletin de liaison LCPC, mars 1995.
- [3] J-C. BRAQUENIER et J. DESNYTER, le béton autoplaçant ou autocompactant, 2000.
- [4] CSTC (centre de recherche), Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités, Belgique, 2004.
- [5] FICHES TECHNIQUES TOME 2 LES BETONS : formulation fabrication et mise en œuvre.
- [6] BOUSSAFER A. Formulations des bétons autoplaçants par la méthode japonaise D'OKAMURA présenté ; Université Constantine thème master 2010-2011
- [7] <https://www.ummtto.dz/dspace/handle/ummtto/5842?locale-attribute=fr>
- [8] F. Dehn, K. Holschemacher, D. Weisse, Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour, LACER (Leipzig Annu. Civ. Eng. Report). (2000)115–124.
- [9] EL Hilali A., 2009 : "Etude expérimentale de la rhéologie et du Comportement des bétons autoplaçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales". These de doctorate, l'université Cergy Pontoise, France.
- [10] Esping O., 2008: Effect of limestone filler BET (H<sub>2</sub>O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol.38, page 938- 944.
- [11] El Barrak M., 2005 : "Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais". These de doctorate, l'université Toulouse III –Paul Sabatier, France.
- [12] Benachour Y., Davy C.A., Skoczylas F., Houari H., 2008: Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar, Cement and Concrete Research, vol.38, page 727–736.
- [13] Felekoglu B., 2007: Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources Conservation & Recycling, vol.51, page 770–791.
- [14] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., 2005: Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, Cement and Concrete Research, vol. 35, page 532– 539.
- [15] Taleb O., Optimisation de la formulation des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux, mémoire de magister de l'université de Tlemcen, Algérie, 2009.
- [16] Bensebti S.E., 2008 : "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux". These de doctorates, Université Mentouri-Constantine, Algérie.

## Liste des références bibliographiques

---

- [17] Zhu W. & Gibbs J.C., 2005: Use of different limestone and chalk powders in self compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, vol.35, page 1457-1462.
- [18] Nanthagopalan P., Haist M., Santhanam M., Müller H.S., 2008: Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions, *Cement and Concrete Composites*, vol.30, page 763–768.
- [19] Carlsward J., Emborg M., Utsi S., Oberg P., 2003: Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Self-Compacting Concrete, <https://www.theses-algerie.com/1467533325702856/memoire-de-master/universite-8-mai-1945-guelma/optimisation-des-parametres-geotechniques-des-sols-par-la-methode-de-taguchi>
- [20] <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/bapp/2020/Cours%20PEX%20-%20Final.pdf>
- [21] <http://thesis.univ-biskra.dz/3992/1/M%C3%A9moire.pdf>
- [22] <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/3478/1/chap%20finale.pdf>
- [23] <http://dspace.univbouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/3478/1/chap%20finale.pdf>
- [24] <https://www.theses-algerie.com/1467533325702856/memoire-de-master/universite-8-mai-1945-guelma/optimisation-des-parametres-geotechniques-des-sols-par-la-methode-de-taguchi>
- [25] <http://dspace.univ-bouira.dz:8080/jspui/handle/123456789/10351>
- [26] <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/8904/1/32-620-278-1.pdf>
- [27] <https://dspace.univ-guelma.dz/xmlui/handle/123456789/884>
- [28] [https://www.researchgate.net/publication/233300784\\_Modelisation\\_de\\_la\\_reponse\\_sismique\\_des\\_structures\\_par\\_la\\_methode\\_des\\_plans\\_d\\_experiences](https://www.researchgate.net/publication/233300784_Modelisation_de_la_reponse_sismique_des_structures_par_la_methode_des_plans_d_experiences)
- [29] [https://books.google.dz/books?id=10Nz4c5sVb8C&pg=PA1&dq=livre+les+plans+d%27exp%C3%A9rience+Richard+linder&hl=en&newbks=1&newbks\\_redir=0&source=gb\\_mobile\\_search&sa=X&ved=2ahUKEwio3siYwKr\\_AhWEhf0HHVBVBPQQ6AF6BAgEEAM](https://books.google.dz/books?id=10Nz4c5sVb8C&pg=PA1&dq=livre+les+plans+d%27exp%C3%A9rience+Richard+linder&hl=en&newbks=1&newbks_redir=0&source=gb_mobile_search&sa=X&ved=2ahUKEwio3siYwKr_AhWEhf0HHVBVBPQQ6AF6BAgEEAM)
- [30] <https://jmp.comsupporthelpfr.djintro.shtml>
- [31] Aichouche « a Détection de la lésion par la linéarisation d'un modèle non linéaire de l'image IM». Mémoire de master université Mohamed haider isra (2003)
- [32] Jacques GOUPY. « LES PLANS D'EXPERIENCES, Revue MODULAD, (2006). *Concrete Research*, vol. 35, page 532– 539.