

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par

- **BELAIFA Islam**
- **BELGHAZI Abdallah**

Intitulé

*Étude du comportement rhéologique et mécanique d'un béton autoplaçant
à base de déchets de céramique*

Examiné sans soutenance le : septembre 2022

Par le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.Rokbane Abdelmajid</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme TABET Souad</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreuse</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Logzit Nacer</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Deboucha sadek</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord qu'il nous soit permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers Dieu de nous avoir donnés le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promotrice **Mme TABET SOUAD** qui nous a été très utile le long de la réalisation de cette recherche. Nos remerciements vont aussi aux **membres de jury** d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leur patience.

Et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

A ma enseignante **Mme TABET SOUAD**

A mes chers parents surtout ma mère, pour leur amour, leur grand soutien et leur vif et permanent encouragement pour donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont fourni les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui

A mes frères et sœurs **Salah , mounir , Hanan** et ma jumelle **Nadjat** , sans oublier les petites **Hadil** et **Hiba**

A ma fiancée **Wiam**

A tous mes amis **Youcef, Achraf ,Aymen, islam, Abderrahmane** et **Ahmed**

BELAIFA ISLAM

Je dédie ce travail :

A ma enseignante **Mme TABET SOUAD**

A mes parents ;

A mes frères et sœurs **Fouzi , Moqdad , hanan , Zinelaabidine** , sans oublier les petites **Dhia ddine , Amani , Oussama , Anfal** et **Rofaida**

A tous mes amis **Abdellah , Ahmed** et **Abderrahmane**

BELGHAZI ABDELLAH

Sommaire

Liste des tableaux.....	i
Liste des figures.....	ii
Résumé	iv
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1

Généralités sur le béton autoplaçant (BAP)

1.1. Introduction.....	2
1.2. Définition du béton auto plaçant.....	2
1.3. Domaine d'utilisation des BAP	3
1.4. Les avantages et inconvénients des BAP	3
1.5. La structure du béton autoplaçant.....	4
1.6. Les principaux constituants des BAP.....	5
1.6.1. Le ciment	5
1.6.2 Addition minérales.....	6
1.7 les adjuvants chimiques.....	7
1.8. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	8
1.8.1 Essai d'étalement.....	8
1.8.2 Essai de la boîte en L (L-box test)	9
1.8.3 Essai de stabilité au tamis.....	10
1.8.4. Essai au rhéomètre.....	11
1.9. Caractérisation des BAP à l'état durci.....	11
1.9 .1 Les essais de compression.....	12
1.9 .2 Les essais de traction par flexion.....	12
1.9.3. Essai d'auscultation sonique	13
1.9.4. Essai au scléromètre :	13
1.10 Différentes méthodes de formulation.....	14
1.11 Conclusion.....	15

CHAPITRE 2

MODELISATION PAR DES PLANS D'EXPERIENCES

2.1. Introduction	16
2.2. Définition.....	16
2.3. Intérêt des plans d'expériences en génie civil.....	17
2.4. Plans de mélange.....	18

2.4.1. Modèle mathématique.....	18
2.5. Démarche méthodologique.....	19
2.6. Conclusion.....	20

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

3.1. Introduction.....	21
3.2. Matériaux utilisés.....	21
3.2.1. Le sable.....	21
3.2.2 Gravier.....	22
3.2.3 Ciment.....	23
3.2.4 Les fillers de calcaire.....	24
3.2.5 Poudre de céramique.....	24
3.2.6 Les Adjuvants.....	25
3.2.6.1. Dosage en super plastifiant.....	26
3.3. Formulation du béton auto plaçant par la méthode française L.C.P.C.....	26
3.3.1. Calcul des constituants d'un BAP selon les normes AFGC.....	26
3.3.2. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais.....	29
3.3.2.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams(slumpflow)	30
3.3.2.2 Essai de stabilité au tamis	30
3.3.2.3 Essai de la boîte en	31
3.3.2.4 Essai au Rhéomètre ICAR	31
3.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci (DT, NDT).....	32
3.4.1 LES ESSAIS DESTRUCTIFS.....	32
3.4.1.1. Essai compression	32
3.4.1.2. Essais traction par flexion	32
3.5 Conclusion.....	32

CHAPITRE 4

EXPLOITATION ET MODELISATION DES RESULTATS

4.1. Introduction.....	33
4.2 Présentation de résultats.....	33
4.2.1 Résultats des essais à l'état frais.....	33

4.2.1.1 Présentation graphique de l'étalement.....	34
4.2.1.2 Présentation graphique de la stabilité au tamis.....	34
4.2.1.3 Présentation graphique des résultats de la Boîte en L.....	35
4.2.1.4. La viscosité et le seuil de cisaillement.....	36
4.2.2 Résultats des essais à l'état durcis.....	37
4.2.2.1 Résistance à la compression.....	37
4.2.2.2 Résistance à la traction par flexion R_f	40
4.3. Modélisation des résultats par plan d'expérience de type (JMP).....	42
4.3.1. L'état frais.....	42
4.3.2. L'état durci.....	44
Conclusion générale et perspectives.....	50
Références bibliographiques.....	51

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Tableau 3.1. Caractéristiques physiques et mécaniques de sable.....	22
Tableau 3.2. Caractéristiques physico-mécaniques des granulats.....	23
Tableau 3.3. Composition et exigences mécaniques selon la norme SN EN 197-1.....	23
Tableau 3.4. Exigences physico-chimiques.....	24
Tableau 3.5. Caractéristique de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 ».....	25
Tableau 3.6. Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.....	25
Tableau 3.7. Formulation des BAP pour un rapport G/S =0.95.....	28
Tableau 3.8. Formulation des BAP pour un rapport G/S =0.85.....	28

CHAPITRE 4

EXPLOITATION ET MODELISATION DES RESULTATS

Tableau 4.1 : Résultats d'essais sur le béton frais.....	33
Tableau 4.2: Résultats des résistances à la compression Rc.....	38
Tableau 4.3. Résultats des résistances à la traction par flexion Rf.....	40

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : le béton autoplaçant.....	2
Figure 1.2 Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO.....	4
Figure 1.3. Mécanisme du superplastifiant.....	8
Figure 1.4. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	9
Figure 1.5. Essai de la boîte en L (L-box test).....	10
Figure 1.6. Essai de stabilité au tamis.....	11
Figure 1.7. Mesure de la résistance à la compression.....	12
Figure 1.8 Mesure de la résistance à la traction par flexion.....	13

CHAPITRE 2

Figure 2.1. optimisation par les plans d'expériences	17
Figure 2.2. Courbe de réponse.....	18
Figure 2.3 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [20].....	19

CHAPITRE 3

Figure 3.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf.....	21
Figure 3.2. Courbes granulométriques du gravier 3/8 et 3/16.....	23
Figure 3.3. Fillers de calcaire.....	24
Figure 3.4. Poudre de céramique utilisée.....	25
Figure 3.5. Détermination du point de saturation au mini cône de Marsh (labo. de GC).....	26
Figure 3.6. Essai d'étalement (laboratoire de génie civil).....	29
Figure 3.7. Stabilité au tamis (laboratoire de génie civil).....	30
Figure 3.8. Essai de la capacité de remplissage (laboratoire de génie civil).....	30
Figure 3.9. Essai de Rhéomètre ICAR (laboratoire de génie civil).....	31
Figure 3.10. Appareil de compression (labo. de GC).....	31
Figure 3.11. Appareil de traction par flexion (labo. de GC).....	32

CHAPITRE 4

Figure 4.1 Résultats d'essais d'étalement sur béton frais.....	34
Figure 4.2 Résultats d'essais de stabilité au tamis.....	34
Figure 4.3 Résultats d'essais de la Boîte en L.....	35
Figure 4.4. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour G/S=0,95.....	36
Figure 4.5. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour G/S=0,85.....	37
Figure 4.6. Histogrammes des résultats de la résistance à la compression (Rc) G/S=0,95	38
Figure 4.7. Histogrammes des résultats de la résistance à la compression (Rc) G/S=0,85.....	39
Figure 4.8. Histogrammes de résistance à la traction par flexion(Rc) G/S=0,95.....	40
Figure 4.9. Histogrammes de la résistance Rf pour G/S=0,85.....	41
Figure 4.10. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	43
Figure 4.11. Surface de réponse des essais à l'état frais.....	44
Figure 4.12. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues	45
Figure 4.13. Surface de réponse des essais à l'état durci.....	46
Figure 4.14. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues	47
Figure 4.15. Surface de réponse des essais à l'état durci.....	48

Résumé

Notre travail consiste à réutiliser des déchets de faïences en céramique sous forme de poudre fine, par remplacement partiel de la masse de ciment et ceci par des pourcentages différents de (2% ,7% et 14%), en faisant varier le rapport G/S (0.95 et 0.85) à chaque fois, et d'étudier leur effet sur la performance du béton auto plaçant BAP à l'état frais ainsi que durci. Une modélisation statistique dite plans d'expérience, de type JMP est utilisée.

Le recyclage de la poudre de céramique avait une influence bénéfique sur les résistances mécaniques R_c et R_f et sur son ouvrabilité. Tous les BAP ont marqué des résistances très proches les unes aux autres, qualifiées comme haute et surtout pour les pourcentages forts en poudre de céramique (BAP₁₋₁₄ et BAP₂₋₁₄)

Mots clés : Béton autoplaçant ; rhéologie ; déchets de céramique ; fillers calcaires ; valorisation modélisation ; plans d'expériences.

Abstracts

Our work consists in reusing ceramic earthen ware waste in the form of fine powder, by partial replacement of the mass of cement and this by different percentages of (2%, 7% and 14%), by varying the ratio G /S (0.95 and 0.85) each time, and to study their effect on the performance of self-compacting concrete (SCC) in the fresh as well as hardened state. Statistical modeling called experience plans, of the JMP type is used.

The recycling of the ceramic powder had a beneficial influence on the mechanical resistances R_c and R_f and on its workability. All the SCC marked resistances very close to each other, qualified as high and especially for the strong percentages in ceramic powder (SCC₁₋₁₄ and SCC₂₋₁₄)

Keywords : Self-compacting concrete ; rheology; ceramic waste; limestone fillers; valuation; modelization ; plans of experiments.

ملخص:

يتمثل عملنا في إعادة استخدام نفايات الخزف على شكل مسحوق ناعم، عن طريق الاستبدال الجزئي لكتلة الأسمنت وذلك بنسب مختلفة (2%، 7% و14%)، بتغيير النسبة الحصى/الرمل مرة بقيمة 0,85 ومرة بقيمة 0,95. ودراسة تأثيرها على أداء الخرسانة ذاتية الصب في حالتها الطرية والصابية. يتم استخدام النمذجة الإحصائية التي تسمى خطط التجربة، من نوع JMP.

كان لإعادة تدوير مسحوق السيراميك تأثير مفيد على المقاومة الميكانيكية R_c و R_f وعلى قابليتها للتشغيل. جميع المقارومات الملحوظة لـ BAP قريبة جداً من بعضها البعض، مؤهلة على أنها عالية وخاصة بالنسبة للنسب المنوية القوية في مسحوق السيراميك (BAP₁₋₁₄ و BAP₂₋₁₄).

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية التوضع. الريولوجيا؛ نفايات السيراميك، حشوات الحجر الجيري تقييم؛ تصميم خطط التجارب.

INTRODUCTION GENERALE

Pour la construction de structures durables et résistantes, on doit développer non seulement un béton présentant des qualités améliorées, mais aussi d'assurer la bonne mise en place pour atteindre les objectifs de la mise en service de la structure. Ces bétons appelés autoplaçants, se développent maintenant dans le monde entier dans de nombreuses applications et peuvent remplacer entièrement les bétons ordinaires dans le futur proche. De nos jours, il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée permettant de choisir précisément les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées du BAP. Les méthodes actuelles sont toutes relativement complexes et essentiellement basées sur les résultats empiriques.

Notre étude s'appuie sur la valorisation des déchets de matériaux industriels locaux en Algérie, pouvant être recyclés par réutilisation dans la conception ou formulation du béton auto plaçant non seulement pour la protection de l'environnement mais aussi afin d'avoir la formulation la plus optimisée. Pour atteindre cet objectif, deux axes ont été traités. Le premier concerne particulièrement une étude expérimentale qui vise à caractériser l'influence des additions minérales (fillers de calcaire et les déchets de céramique sous forme de poudre très fine) et le rapport G/S sur la performance rhéologique et mécanique du BAP, s'appuyant sur le deuxième axe qui représente une modélisation par plan d'expériences où des modèles mathématiques de prévision des réponses rhéologiques et mécaniques seront proposés.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Une partie théorique où l'on passe en revue, les caractéristiques les plus importantes des bétons autoplaçants dans un premier chapitre, et les plans d'expériences dans un deuxième chapitre.

Une partie expérimentale contenant les essais de caractérisation des matériaux utilisés et méthode de formulation des BAP ainsi que les essais de caractérisation recommandés par AFGC dans le troisième chapitre. Les résultats trouvés seront traités et analysés quantitativement et statistiquement dans le quatrième chapitre.

CHAPITRE 1

Revue générale sur les bétons autoplaçants (BAP)

1.1. Introduction

Les bétons autoplaçant(BAP) ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter les cadences de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre de béton.

Ce premier chapitre fait l'objet d'une initiation au BAP, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP [1].

1.2. Définition du béton auto plaçant

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux à haute performance qui se caractérisent essentiellement par leur fluidité à l'état frais et leur homogénéité à l'état durci. Ces bétons ont la capacité de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport de vibration même dans les coffrages très ferrailés, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre [2].

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- ✓ Une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement)
- ✓ Une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation).



Figure (1.1) : le béton autoplaçant [1]

1.3. 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 [3]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

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

1.4. Les avantages et inconvénients des BAP

- ✓ Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- ✓ Bétonnage en milieux fortement ferrailés.
- ✓ Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- ✓ Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- ✓ Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP).
- ✓ Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- ✓ Réalisation d'éléments de forme complexe.
- *Comme inconvénients, on distingue*

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les

préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [4].

1.5. La structure du béton autoplaçant

Le BAP est formulé différemment qu'un béton ordinaire (BO) voir la Figure.II.1. Dans son cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons. Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée, d'autres adjuvants chimiques tels que les agents colloïdaux (dits aussi agents de viscosité) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité de béton, en revanche, leur utilisation est au contraire peu répandue, car ils engendrent un surcoût, qui s'ajoute à ceux dus au superplastifiant et aux additions minérales, les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [5].

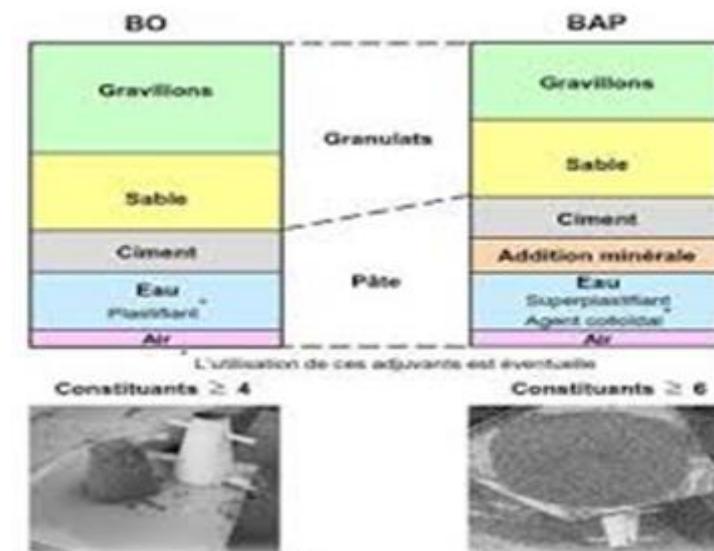


Figure 1.2 Comparaison entre la structure d'un BAP et celle d'un BO [9].

De manière plus approfondie, les recherches consacrées aux BAP nous permettent de souligner cinq particularités de leur structure dont le détail est décrit ci-dessous.

- ✓ Un volume de pâte élevé,
- ✓ Une quantité importante de fines,
- ✓ Un faible volume de gravillons,
- ✓ Un fort dosage de super plastifiant,
- ✓ L'utilisation éventuelle d'agent colloïdal [6].

1.6. Les principaux constituants des BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix, étant donné le mode de mise en place des BAP, il convient de porter une attention particulière au type de liant ainsi qu'à la granulométrie des gravillons si l'on désire obtenir de meilleures qualités de béton.

Généralement, on peut diviser les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques [5].

1.6.1. Le ciment

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

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CME et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [6]

CEM I: Ciment Portland (CPA)- CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).

CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Ciment composé (CLC).

Le ciment utilisé dans cette étude est le CEM I: Ciment Portland (CPA), décrit dans sa fiche technique comme suit :

CEM I 42.5 R Ciment portland : pour les bétons hautes performance et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid en hiver.

CEM I 42.5 R : Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).

Domaines d'application

Un ciment pour tous les travaux de constructions de haute résistance à jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté.

Applications recommandées

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

1.6.2 Additions minérales

Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite,...), des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des limnées de silice.

a) Les fillers calcaires

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80µm, sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaires naturelles ou non. Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines

- Propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation [7].

- Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du liant, les fillers calcaires doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75 % en masse [8].

b) Déchets de céramique

La poudre de céramique est récupérée après ajustement des bords des carreaux de faïence en céramique qu'on fait passer au tamis de $80\mu\text{m}$ pour aboutir à la finesse voulue.

1.7. Les Adjuvants chimiques

Les adjuvants chimiques sont des agents organiques ou inorganiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de liant, provoquent des modifications de certaines propriétés de ceux-ci comme la rhéologie, les propriétés mécaniques et la durabilité.

Depuis plusieurs dizaines d'années, leur usage s'est généralisé et on peut admettre aujourd'hui que la grande majorité des bétons prêts à l'emploi contiennent des adjuvants. Au fur et à mesure du développement de leur emploi, la formulation des adjuvants est devenue de plus en plus élaborée et fait appel à des produits de synthèse.

Parmi les adjuvants utilisés, on cite :

Super-plastifiants

La fluidité des bétons autoplaçants est obtenue en ajoutant des super-plastifiants. Les super-plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fillers en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau., ainsi les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante

Le niveau élevé de l'ouvrabilité requis par les bétons autoplaçants tout en maintenant la stabilité du mélange a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le béton autoplaçant, était impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour les résistances à la

compression souhaitées. L'arrivée des super-plastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des bétons autoplaçants. Les super-plastifiants modernes (basés sur les éthers poly carboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange béton. Ces supers plastifiants réalisent ce qui est montré dans la **Figure.1.3**, avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique. Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit [9].

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

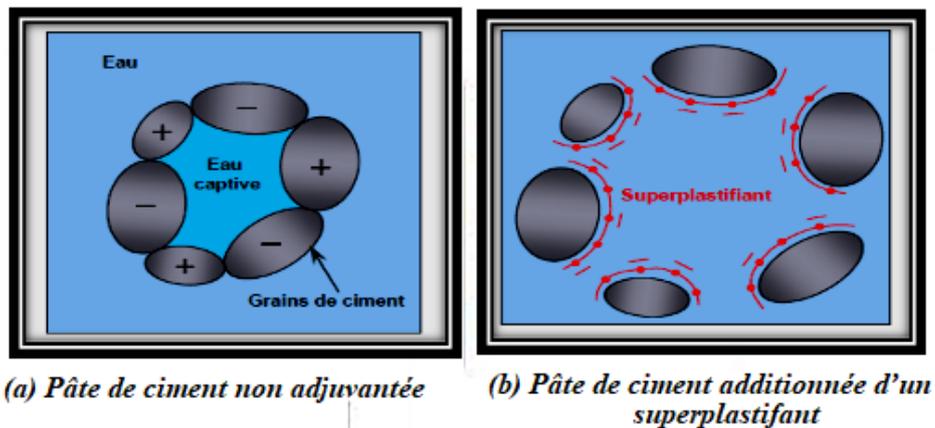


Figure 1.3. Mécanisme du superplastifiant [9].

1.8. Caractérisation des BAP à l'état frais

Les essais recommandés par l'association française de génie civil (AFGC) sont :

1.8.1 Essai d'étalement

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser. Il permet de mesurer la consistance ou l'écoulement d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (**Figure 1.4**). Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP.

Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a eu lieu ou non [10].

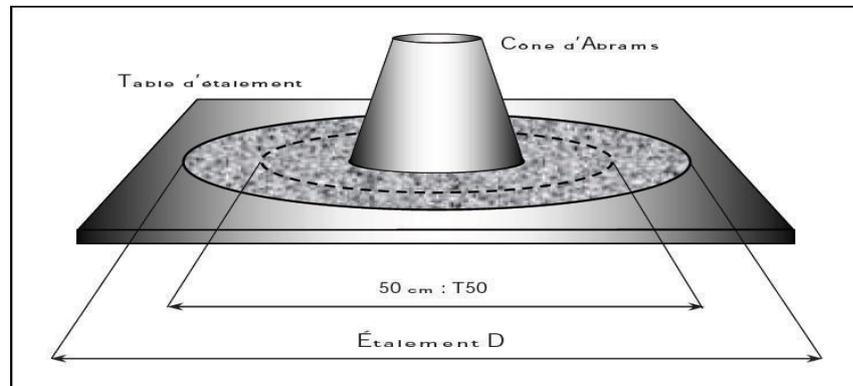


Figure 1.4. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)[10].

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçant

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette
- En traçant à la truelle des lignes dans la « galette », on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône,

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident la formulation, expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

1.8.2 Essai de la boîte en L (L-box test) :

Cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. La partie verticale du L (**Figure.1.5**) est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres Ø 14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres).

Pour que le béton autoplaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H/Lmax) doit être supérieur à 0,8 [10].



Figure 1.5. Essai de la boîte en L (L-box test)[10].

1.8.3 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons Autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure I.5). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [11] .

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm

Les critères d'acceptabilité sont divisés en trois classes [10] :

- $0\% \leq \% P \text{ laitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% P \text{ laitance} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ
- $\% P \text{ laitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.

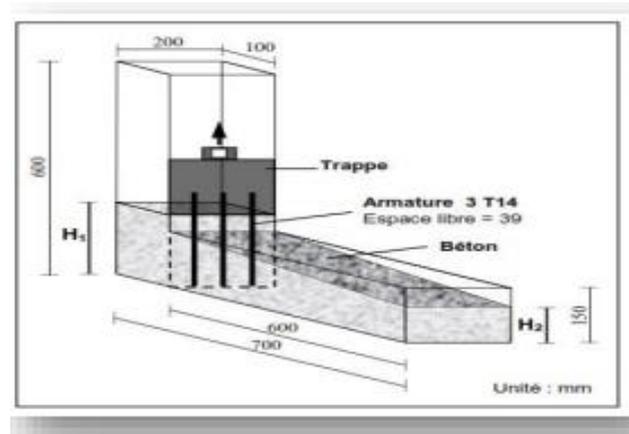


Figure 1.6. Essai de stabilité au tamis [10].

1.8.4. Essai au rhéomètre

En condition de chantier, l'outil de caractérisation de l'ouvrabilité le plus courant dans le monde est le cône d'Abrams utilisé pour le test d'affaissement. Selon l'affaissement mesuré, les bétons sont qualifiés de ferme, plastique, très plastique et fluide. Cependant une autre interprétation de l'ouvrabilité est fondée sur la rhéologie. La rhéologie est une partie de la physique qui étudie la plasticité, l'élasticité, la viscosité et la fluidité caractéristiques des corps déformables. Dans ce cas, la caractérisation de l'ouvrabilité d'un béton demande l'usage d'outils plus sophistiqués qu'un cône d'Abrams. Nous utilisons pour cela un rhéomètre spécialement conçu pour les bétons. Ce type de dispositif permet la mesure simultanée du couple et de la vitesse auquel est soumis l'outil de malaxage en rotation. L'opération est répétée automatiquement à plusieurs vitesses de rotation. Un diagramme vitesse-couple est constitué. Pour les bétons, nous obtenons classiquement, une droite dont la mise en équation aboutit au modèle de Bingham. Ce modèle de Bingham décrit l'écoulement du béton à l'aide d'une équation ayant la forme : $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$

Où τ est la contrainte de cisaillement appliquée au matériau, $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse (appelé aussi vitesse de cisaillement), τ_0 le seuil de cisaillement (en Pa), et μ , la viscosité plastique (en Pa.s).

1.9. Caractérisation des BAP à l'état durci

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- Les essais destructifs tels que l'essai de compression et celui de traction par flexion ;

- Les essais non destructifs tels que l'essai au scléromètre et l'ultrason.

1.9.1 Les essais de compression

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cubique de 10cm de cotés conformément aux prescriptions de la norme. Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (**Figure 1.7**). La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée.



Figure 1.7. Mesure de la résistance à la compression

1.9.2 Les essais de traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (**Figure 1.8**). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = Mf.a/2I$, avec le moment de flexion :

$Mf = F.L/4$, où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme.



Figure 1.8 *Mesure* de la résistance à la traction par flexion

1.9.3. Essai d'auscultation sonore : [EN 12504-4]

Mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisé aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est également normalisée par les normes françaises (EN 12504-4) et américaines (ASTM-C597-02) [12].

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur. Cette méthode permet principalement de détecter :

- L'homogénéité et l'uniformité, ou le contraire, du béton de la structure
- Des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de « nids de cailloux » et la détérioration due au feu, au gel ou à des agressions chimiques... [13]
- Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures, à partir des relations. [13]

Cependant, la vitesse mesurée dépend également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par l'essai destructif de compression en laboratoire. [14]

1.9.4. Essai au scléromètre : [EN 12398]

Le scléromètre est un appareil relativement simple d'utilisation, il est destiné à mesurer, indirectement, la résistance à la compression du béton à partir de la mesure de sa dureté

superficielle. Il existe une relation empirique de corrélation entre cette résistance et un indice dit " indice sclérométrique" et qui consiste à traduire la dureté du béton. [15]

1.10 Différentes méthodes de formulation

Plusieurs approches se sont développées pour formuler un BAP plus performant dont on cite :la méthode Suédoise, la méthode japonaise, méthode française...

Description de la méthode Française(LCPC)

Proposée par De Larrard et al [7] : Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

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

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

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- Le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiants est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes. [7]

1.11 Conclusion

Il existe à ce jour plusieurs méthodes de formulation du béton autoplaçant, et la plus part de ces formules sont conçues actuellement de manière empirique. Suivant les caractères à l'état frais on peut juger la formulation acceptable ou non.

A cet effet l'[AFGC], a émis des recommandations qui se limitent en trois essais :
Mesure d'étalement ; essai de la boîte en « L » ; et l'essai de stabilité au tamis.

Un essai de contrôle de l'ouvrabilité par rhéomètre est utile pour qualifier le béton.

CHAPITRE 2

MODELISATION PAR DES PLANS D'EXPERIENCES

2.1. Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [16]. 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 . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y=f(x_i)$$

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 [17]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

2.2. Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres (facteurs) tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques. Le diagramme résume de manière plus simple cette définition [18].

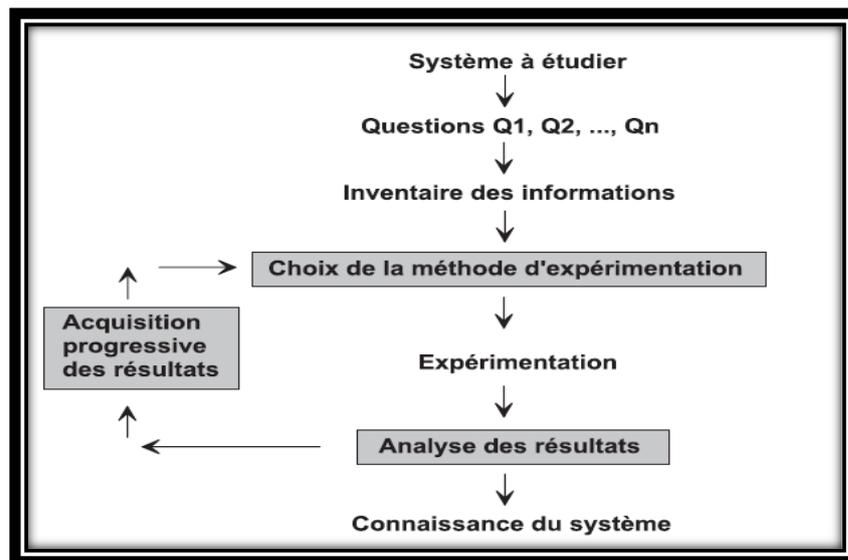


Figure2.1 : Optimisation par plan d'expériences : Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances [18].

2.3. Intérêt des plans d'expériences en génie civil

L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons. Parmi ces facteurs, on peut citer : le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport E/L, le rapport Additions/Ciment, le dosage en adjuvant, le rapport G/S,...

L'analyse statistique peut être réalisée en utilisant certains logiciels tels que le JMP, design expert.... Ainsi, des modèles mathématiques obtenus par régression peuvent être développés en fonction des différents facteurs. Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton s'impose chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes. En termes d'expériences, il suffit de fixer, à un niveau constant, toutes les variables d'un problème sauf celles dont on espère étudier l'influence

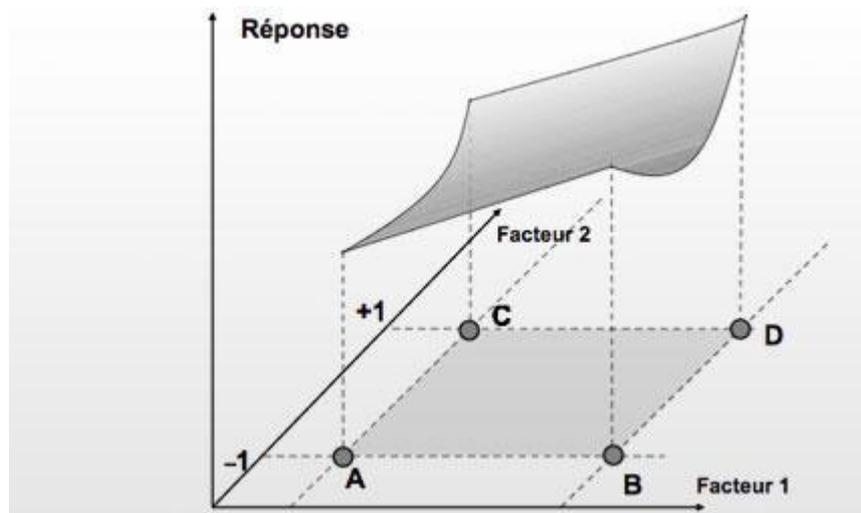


Figure 2.2. Courbe de réponse

2.4. Plans de mélange

Les plans de mélange sont des plans d'expériences que l'on utilise lorsque l'on étudie des produits composés de plusieurs constituants. L'objectif est de trouver la loi qui régit une ou plusieurs réponses en fonction de la composition du mélange [19]

2.4.1. Modèle mathématique

Les facteurs sont les concentrations x_i de chaque constituant i du mélange. Les réponses y sont exprimées en fonction de ces concentrations. Il faut tenir compte de la contrainte suivante : la somme des concentrations des constituants d'un mélange est égale à cent pour cent. Il existe donc la relation suivante entre les x_i :

$$\sum x_i = 1$$

C'est la relation fondamentale des mélanges.

Il ne reste donc, dans le modèle mathématique, que les termes du premier degré et les termes rectangles.

$$y = \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{i...l} x_i \dots x_l$$

2.5. Démarche méthodologique

Le schéma ci-dessous présente un organigramme général de traitement des plans d'expériences [20]

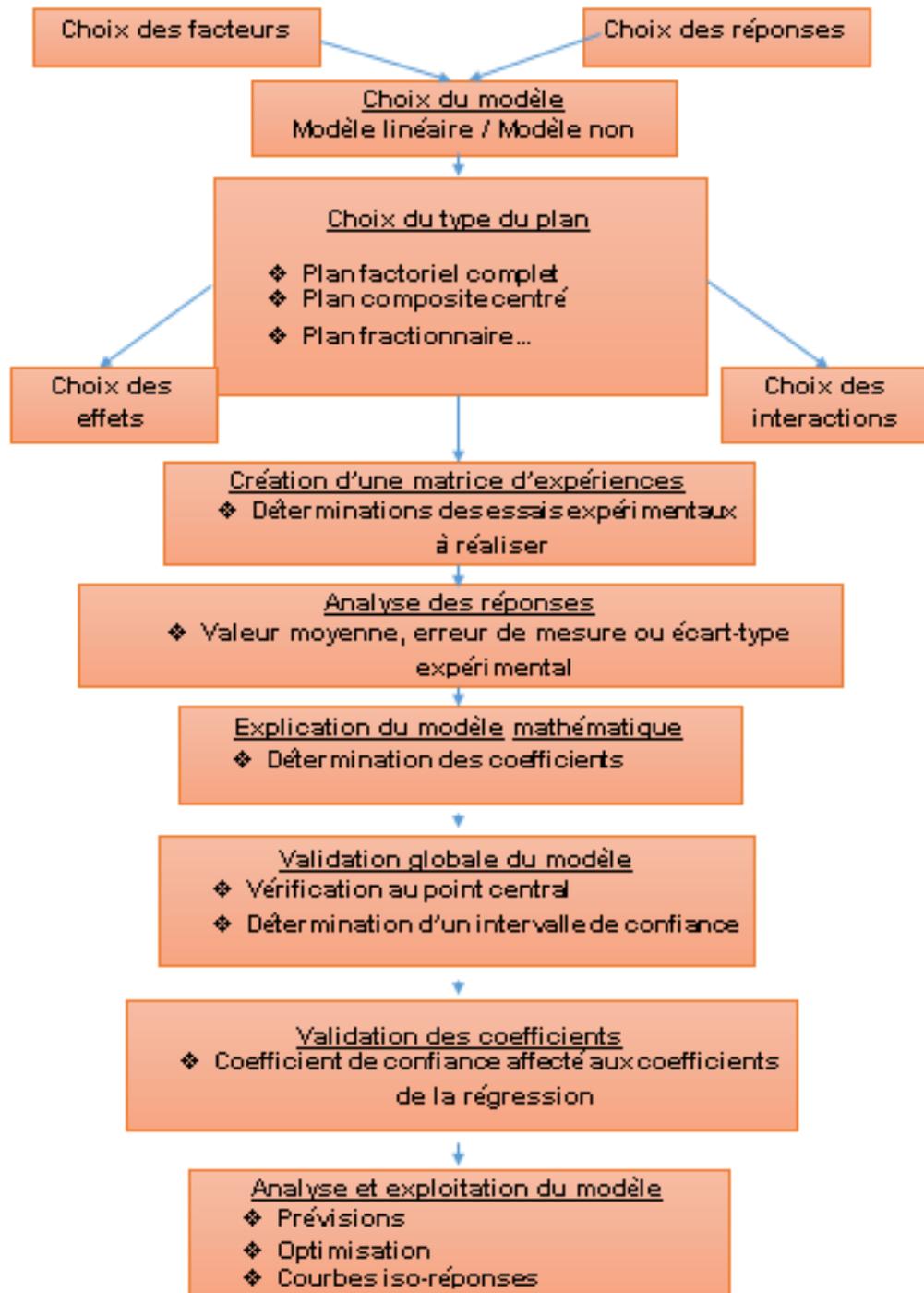


Figure 2.3 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [20]

2.6. Conclusion

Faire un plan d'expériences, c'est planifier et structurer de manière systématique et rigoureuse l'ensemble des expériences à plusieurs variables, dans le but d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les performances à étudier. L'objectif essentiel d'un plan d'expériences est de réduire au minimum le nombre de mesures expérimentales par rapport à une approche classique, tout en assurant une qualité de résultats, et en obtenant une certaine capacité prédictive grâce à une modélisation mathématique.

CHAPITRE 3

Caractérisation des matériaux utilisés et formulation

3.1. Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton autoplaçant (BAP).

Les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Bordj Bou Arreridj

Les matériaux utilisés sont :

- Le sable de dune de la région d'Oued Souf ;
- Le gravier provenant de la carrière **Mechri BBA** ;
- Ciment CPJ 42.5 provenant de la cimenterie Lafarge de BISKRIA CIMENT
- Les fillers : les fines calcaires.
- Les adjuvants : le **super-plastifiant MEDAFLOW 30** de Granitex
- L'eau potable du laboratoire
- Poudre de céramique : récupérée des déchets de de faiences en céramique.

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Le sable

- **Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650]**

L'analyse granulométrique, selon la norme [NF EN P18-650], Les résultats sont exploités sous forme de courbe granulométrique :

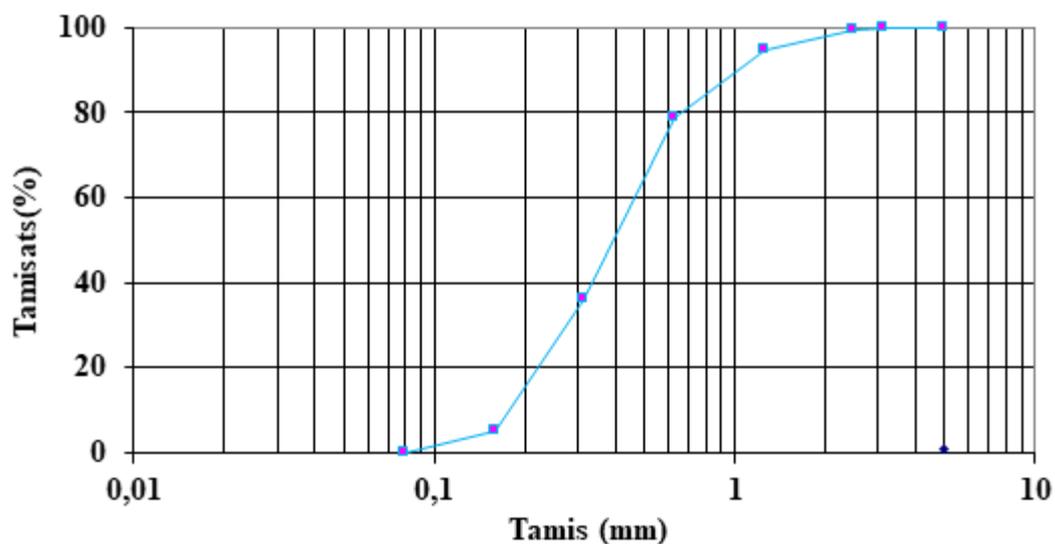


Figure 3.1. Courbe granulométrique du sable Oued Souf

➤ **Caractéristiques physiques**

Tableau 3.1. Caractéristiques physiques et mécaniques de sable

Caractéristiques physiques	Densité absolue	Densité apparente	Porosité (%) $P = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$	Compacité (%) $C = 1 - P$	Indice de vides E $E = \frac{P}{C}$
Valeurs moyennes	2.608	1.568	39.877	60.122	0.663

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

C'est un facteur très important, calculé par la relation suivante : $Mf = \sum Rc/100$

Pour notre sable, $Mf = 2$ donc c'est un sable fin à moyen.

➤ **Equivalent de sable [NF EN 18-598]**

(E.S.V) moy=88.79

(E.S.P) moy=86.25

C'est un sable très propre : l'absence totale de fines argileuses

3.2.2 Gravier

- Dans ce paragraphe, on présente les caractéristiques physico-mécaniques des deux classes granulaires du gravier utilisé : fraction 3/8 et fraction 8/16.

➤ **L'analyse granulométrique**

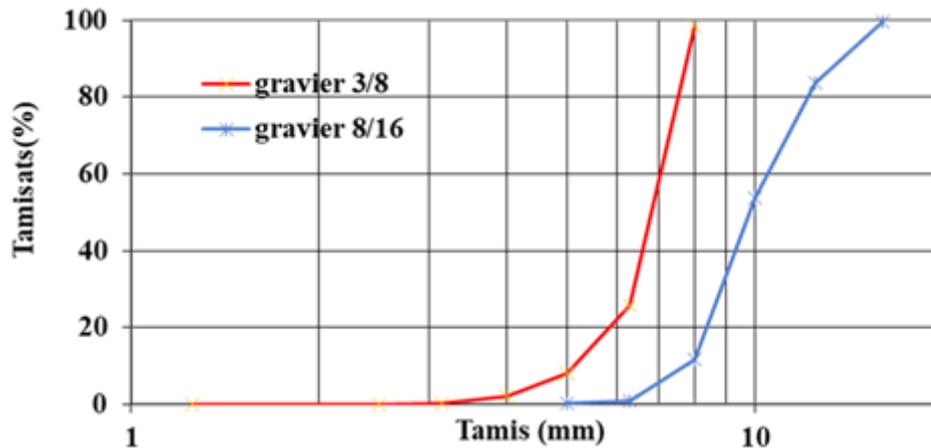


Figure 3.2. Courbes granulométriques du gravier 3/8 et 3/16

Tableau 3.2. Caractéristiques physico-mécaniques des granulats

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

3.2.3 Ciment

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland CEM I de classe 42.5, provient de la cimenterie de Biskra avec les caractéristiques ci-dessous.

Tableau 3.3. Composition et exigences mécaniques selon la norme SN EN 197-1

ciment Portland CEM I		Résistance à la compression (MP a)				Temps de début de prise (minutes)	Stabilité (expansion) mm	
Clinker de Ciment Portland	Constituants secondaires	Classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante			
			2 jours	7 jours	28 jours			
95–100%	0–5%	42,5 N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤62,5	≥60	≤10

Tableau 3.4. Exigences physico-chimiques

Propriétés chimiques			Propriétés physiques	
	Exigences	Valeurs indicatives Vigier	Densité absolue	SSB (gr/cm ²)
Teneur en sulfate (SO ₃)	≤3,5%	<3,0%	3,15	> 4000
Teneur en chlorure	≤0,10%	<0,06%		

3.2.4 Les fillers de calcaire

La gamme de carbonate de calcium se caractérise par sa grande blancheur et sa pureté chimique ses propriétés physico-chimiques lui permettent d'être utilisée dans toutes les applications industrielles du CaCO_3 .

Le calcaire utilisé dans cette étude est caractérisé par une densité absolue de 2.8 et d'une surface spécifique de Blaine de $3500 \text{ cm}^2 / \text{g}$.



Figure 3.3.Fillers de calcaire

3.2.5 Poudre de céramique

La céramique est un déchet récupéré sous forme de poudre lors du polissage des faïences produites servant pour revêtement de la SARL EL-NOURASI située à Mila, une entreprise de matériaux de construction en céramique.

Après séchage de la poudre on l'a faite passer au tamis 0,08 mm afin d'assurer sa finesse.

La mesure de la densité absolue a donné la valeur de **2,6**.



Figure 3.4.Poudre de céramique utilisée.

3.2.6 Les Adjuvants

Nous avons utilisé un adjuvant de type super plastifiants appelé « **MEDAFLOW 30** » fabriqué par la société Granites à Oued Smar- Alger. C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de poly-carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons et permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Tableau 3.5. Caractéristique de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 »

Aspect	Couleur	PH a 200C	Densité	Chlorure	Extrait sec
Liquide	Brun clair	6 - 6.5	1.07 + 0.01	< 0.1 g/l	30%

Tableau 3.6. Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci

« MEDAFLOW 30 » à l'état frais	« MEDAFLOW 30 » à l'état durci
Obtention un rapport E/C très faible	Augmenter la résistance mécanique à jeune âge et à long terme
Amélioré la fluidité et la maniabilité	Diminuer la porosité
Eviter la ségrégation et facilité la mise en Ouvre	Diminuer le retrait et le risque de fissuration

3.2.6.1. 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 3.5**.

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



Figure3.5. Détermination du point de saturation au mini cône (labo. de GC)

3.3. Formulation du béton auto plaçant par la méthode française L.C.P.C

Une formulation de béton auto plaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle, la teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée, le dosage en super plastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto plaçant sont atteintes

3.3.1. Calcul des constituants d'un BAP

La méthode de calcul des différents constituants est identique pour tous les mélanges pour cela, on donne uniquement un seul exemple de calcul détaillé pour la formule de base du béton témoin ayant un rapport G/S de 0,95 pour un mètre cube de béton et par la suite faire l'équivalent pour 46 ℓ de béton, quantité nécessaire pour la confection des éprouvettes.

- **Dosage en ciment C** : $C = 400 \text{ Kg} / \text{m}^3$;
- **Dosage en fillers Calcaire Fc** : $Fc = 10\%$ de la masse du Ciment
Alors $Fc = 10\% * 400 = 40 \text{ Kg} / \text{m}^3$
- **Liant L** : $L = C + Fc$ d'où $L = 400 + 40 = 440 \text{ Kg/m}^3$;
- **Quantité du super plastifiant Sp**: $Sp = 1,9\% * L$ alors $Sp = 1,9\% * 440 = 8,36 \text{ Kg}$;
- **Quantité d'eau de gâchage** : on a choisi comme rapport eau et liant la valeur 0,38
Donc $\text{Eau/Liant} = E/L = 0,38$ d'où $E = L * 0,38 = 440 * 0,38$ $E = 167,2 \text{ kg}$

La quantité d'eau Esp qui se trouve dans le super plastifiant représente 70%, donc

$$Esp = 70\% * Sp$$

On aura : $Esp = 70\% * 8,36 = 5,85 \ell$

L'eau de gâchage E_g sera $E_g = E - E_{sp} = 167,2 - 5.85 E_g = 161.35 \ell$

- **Détermination du volume des granulats $V_{granulats}$**

$V_{p\hat{a}te} = M_{ciment}/\rho_c + M_{calcaire}/\rho_F + M_{Eau}/\rho_E + M_{SuperPlastifiant}/\rho_{Sp}$,

$$\text{On aura : } V_{p\hat{a}te} = \frac{400}{3.15} + \frac{40}{2.73} + \frac{161.35}{1} + \frac{8.36}{1.07} = 312.84L$$

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

$$V_{granulats} = 1000 - (312.84 + 25) \text{ d'o\`u } V_{granulats} = 662.155 \ell$$

Cette valeur représente la somme des volumes des graviers V_{gr} et sable V_s

Le dosage en masse du Sable : on sait que $G/S = 0,95$ donc $V_g = V_s * 0.95$

et que $V_{granulats} = V_s + V_{gr}$, on aura $V_s + V_g = 662.155$ donc

$$(V_s * 0.95) + V_s = 662.155$$

$$V_s(1+0.95) = 662.155 \quad V_s = \frac{662.155}{1.95} = 339.56 \ell \quad V_s = 339.56 \ell \text{ avec } \rho_s = 2,54 \text{ Kg/ } \ell$$

ainsi sa masse est : **$M_{sable} = 862.497 \text{ kg}$**

Le dosage en masse des graviers

$$V_g = 662.15 - 339.56 = 322.58 \text{ donc } V_g = 322.58 \ell$$

$$G3/8 \Rightarrow 40 \% \text{ donc } \frac{322.58 * 40}{100} = 129.055 \ell$$

$$\text{Avec } \rho_s = 2,68 \text{ Kg/ } \ell \text{ alors } M = 345.867 \text{ kg}$$

$$G8/16 \Rightarrow 60 \% \text{ donc } \frac{322.58 * 60}{100} = 193.553 \ell$$

$$\text{Avec } \rho_s = 2,72 \text{ Kg/m}^3 \text{ alors } M = 526.464 \text{ kg}$$

Clarification :

Les symboles $BAPi-j$ présentés dans les tableaux 3.2.1 et 3.2.2 :

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

Les j représentent les pourcentages de céramique.

Tableau 3.7. Formulation des BAPs pour un rapport G/S =0.95

Constituants	Quantité des BAPj-i en Kg							
	BAP ₁₋₀ 0% céramique		BAP ₁₋₂ 2% céramique		BAP ₁₋₇ 7% céramique		BAP ₁₋₁₄ 14% céramique	
	1 m3	46 ℓ	1 m3	46 ℓ	1 m3	46 ℓ	1 m3	46 ℓ
Ciment	400	18,4	392	18,03	372	17,11	344	15,83
Gravier 3/8	345.86	15.90	345.86	15.90	345.86	15.90	345.86	15.90
Gravier 8/16	526.46	24.21	526.46	24.21	526.46	24.21	526.46	24.21
Sable	862.49	39.67	862.49	39.67	862.49	39.67	862.49	39.67
Eau	161.35	7.421	161.35	7.42	161.35	7.42	161.35	7.42
Super plastifiant	8.36	0.38	8.36	0.38	8.36	0.38	8.36	0.36
Filler de calcaire	40	1.84	40	1.84	40	1.84	40	1.84
Céramique	0	0	8	0.368	28	1.29	56	2.58

Tableau 3.8. Formulation des BAPs pour un rapport G/S =0.85

Constituants	Quantité des BAPj-i en Kg							
	BAP ₀₋₂ 0% céramique		BAP ₂₋₂ 2% céramique		BAP ₂₋₇ 7% céramique		BAP ₂₋₁₄ 14% céramique	
	1 m3	46 ℓ	1 m3	46 ℓ	1 m3	46 ℓ	1 m3	46 ℓ
Ciment	400	18,4	392	18,03	372	17,11	344	15,83
Gravier 3/8	326.12	15	326.12	15	326.12	15	326.12	15
Gravier 8/16	496.48	22.83	496.48	22.83	496.48	22.83	496.48	22.83
Sable	909.11	41.81	909.11	41.81	909.11	41.81	909.11	41.81
Eau	161.35	7.421	161.35	7.42	161.35	7.42	161.35	7.42
Super plastifiant	8.36	0.38	8.36	0.38	8.36	0.38	8.36	0.36
filler de calcaire	40	1.84	40	1.84	40	1.84	40	1.84
céramique	0	0	8	0.368	28	1.29	56	2.58

3.3.2. Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais

Les essais proposés par L'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés.

- **La procédure à suivre pour mettre en place un BAP est décrite comme suivant [NA EN 123906 -2]**
 - Introduire gravier 8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8
 - Malaxer pendant 1 min et 30 secs.
 - Introduire la quantité d'eau.
 - Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement
 - Mesurer l'étalement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré et visé.

Donc : le temps total de malaxage est de 4 min et 30 secs.

3.3.2.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slumpflow) [NF EN 12 350-8]

L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.



Figure 3.6. Essai d'étalement (laboratoire de génie civil)

3.3.2.2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]

L'essai de stabilité au tamis (figure 19) vise à qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation.



Figure 3.7. Stabilité au tamis (laboratoire de génie civil)

3.3.2.3 Essai de la boîte en [L NF EN 12 350-10]

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.



Figure 3.8. Essai de la capacité de remplissage (laboratoire de génie civil)

3.3.2.4 Essai au Rhéomètre ICAR

Ce rhéomètre est plus efficace pour les bétons incorporant de grandes quantités de fines et pour les bétons thixotropes car la méthode d'essai ajoute de l'énergie au béton et fournit, en conséquence, une mesure dynamique.

Le rhéomètre à bétons utilisé dans le cadre de notre étude est un rhéomètre ICAR, associé à un ordinateur.



Figure 3.9. Essai de Rhéomètre ICAR (laboratoire de génie civil)

Dans ce but, le rhéomètre à bétons ICAR est utilisé pour identifier les paramètres rhéologiques des bétons autoplaçants frais telle que la contrainte de cisaillement τ en fonction de la viscosité μ , le seuil de cisaillement τ_0 ainsi que la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

3.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci

3.4.1 LES ESSAIS DESTRUCTIFS

3.4.1.1. Essai compression [NF EN206-1]

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.

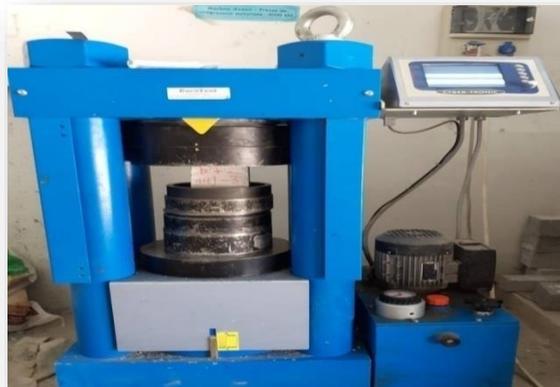


Figure 3.10. Appareil de compression (labo. de GC)

3.4.1.2. Essais traction par flexion : [NF EN P 18-408]

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

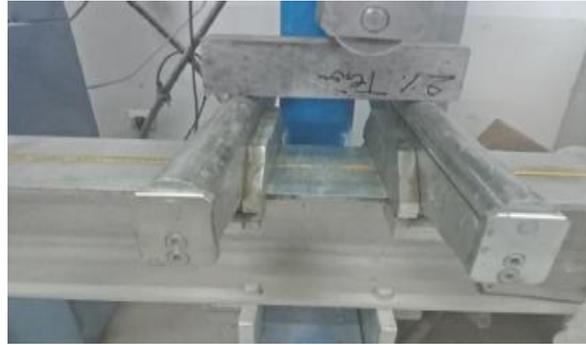


Figure3.11.Appareil de traction par flexion (labo.de GC)

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le programme expérimental pour une caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation du béton autoplaçant à base de 10% calcaire complémentaire du poids de ciment et de 1.9% de superplastifiant du poids de filler plus des % pourcentages différents de poudre de céramique (2% ,7%,14%) de la masse du ciment. Une description sur le protocole de conception de ce type de béton ainsi que les formules de calcul et les critères fondamentaux de chaque essai sont décrits aussi.

CHAPITRE 4

EXPLOITATION ET MODELISATION DES RESULTATS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats obtenus à partir des essais expérimentaux et l'analyse de chaque modification apportée par l'ajout du Céramique utilisé en fonction de leurs taux d'addition (2%,7%14%). Afin de bien valoriser les ajouts utilisés, on a procédé à la quantification de leurs effets sur la rhéologie, la résistance à la flexion et la résistance à la compression.

Par ailleurs, et pour mener à bien la composition du mélange étudié, on a utilisé la nouvelle technique de "plan d'expérience".

4.2 Présentation de résultats

4.2.1 Résultats des essais à l'état frais

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de poudre céramique.

Tableau 4.1 : Résultats d'essais sur le béton frais

Type de Béton	L'étalement (cm)	Stabilité de tamis (%)	Boite en L H2/H1
BAP₁₋₀	71	3.25	1
BAP₁₋₂	67.5	5.12	0.94
BAP₁₋₇	66	4.20	0.90
BAP₁₋₁₄	70.5	3.60	1
BAP₂₋₁	70	3.93	1
BAP₂₋₂	68	4.60	0.94
BAP₂₋₇	65	4.75	0.88
BAP₂₋₁₄	69	5.33	1

4.2.1.1 Présentation graphique de l'étalement

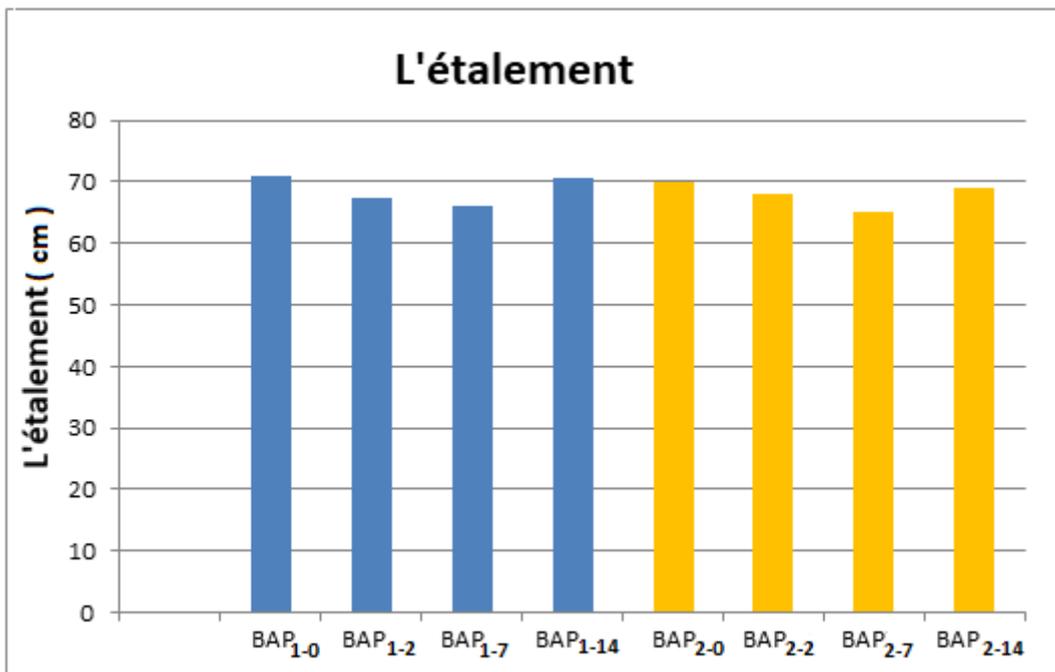


Figure 4.1 Résultats d'essais d'étalement sur béton frais

4.2.1.2 Présentation graphique de la stabilité au tamis

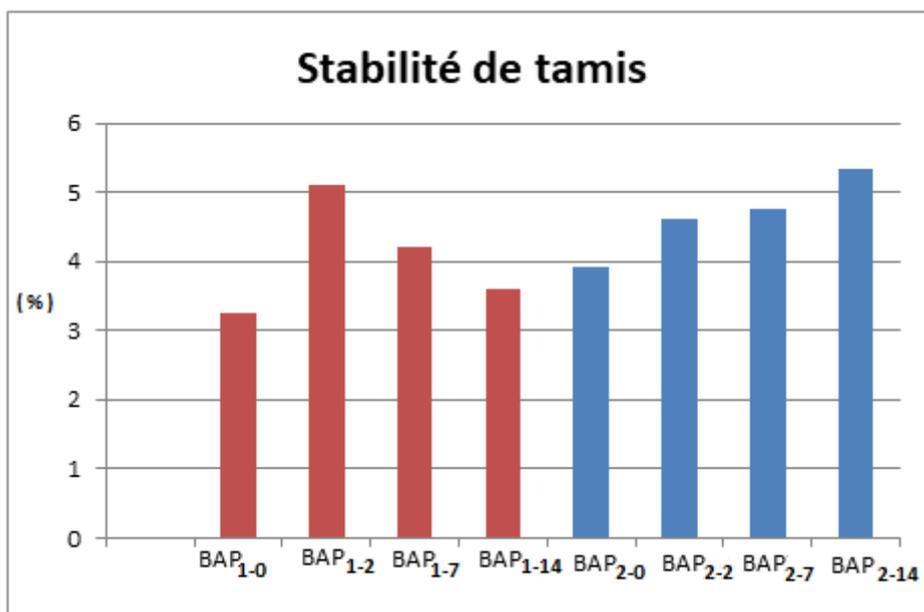


Figure 4.2 Résultats d'essais de stabilité au tamis

4.2.1.3 Présentation graphique des résultats de la Boîte en L

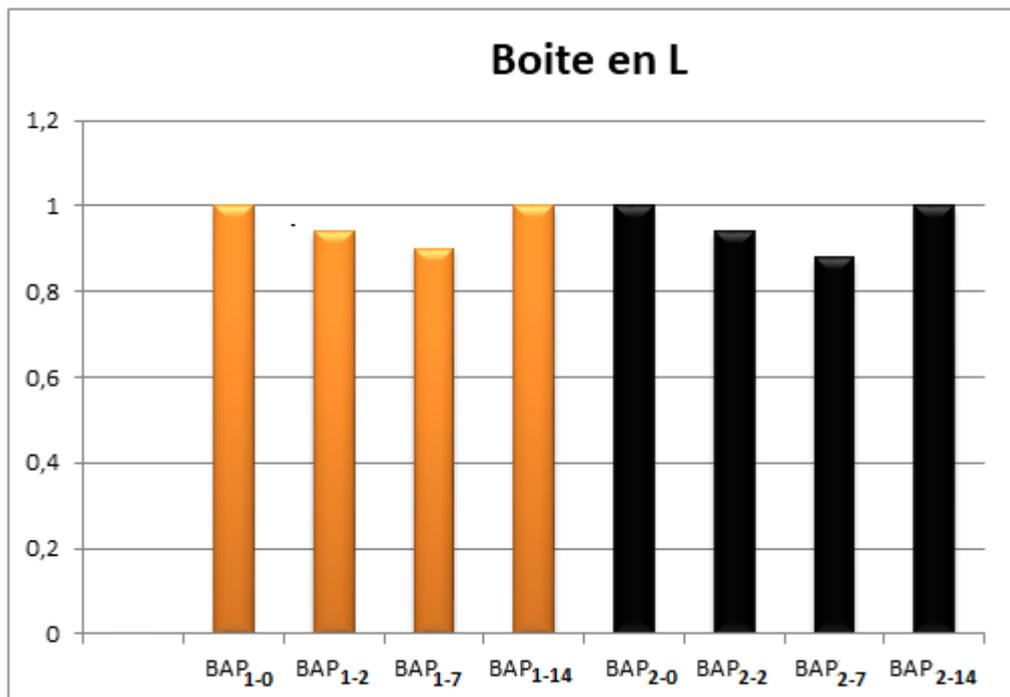


Figure 4.3 Résultats d'essais de la Boîte en L

Commentaires :

D'après les résultats inscrits dans les tableaux et les figures ci-dessus : Les étalements des bétons autoplaçant testés sont entre 65 et 71,5, le taux de remplissage à la boîte en L est de l'ordre 95%, la laitance est inférieure à 15% selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considérée comme satisfaisante.

On remarque aussi que l'accroissement de la teneur en addition céramique de pourcentage différent 2%, 7% et 14% n'influent pas sur la résistance à la ségrégation. Ce résultat s'explique du fait que les grains de l'addition minéral améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue.

Les résultats trouvés par l'essai de la boîte en L, présentés sur la figures 4.3 nous indiquent que toutes les valeurs sont parfaites, on peut dire que ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné cela malgré les armatures qui font obstacle.

L'essai de stabilité aux tamis montre qu'on n'a pas une ségrégation malgré la grande fluidité ce qui est paradoxal à première vue. Le tableau 4.2.1 montre que toutes les valeurs sont inférieures à 15%

4.2.1.4. La viscosité et le seuil de cisaillement

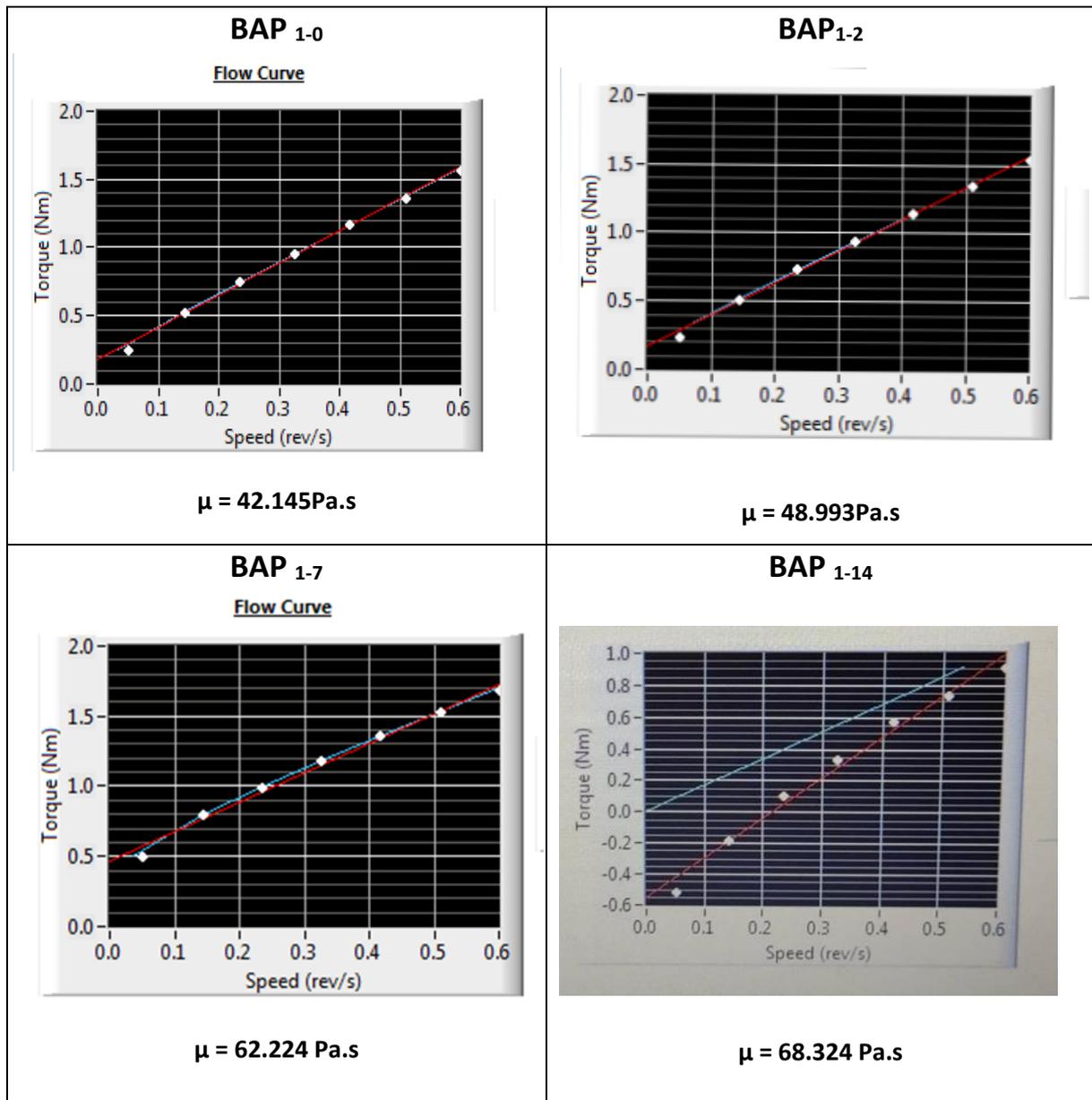


Figure 4.4. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour $G/S=0,95$

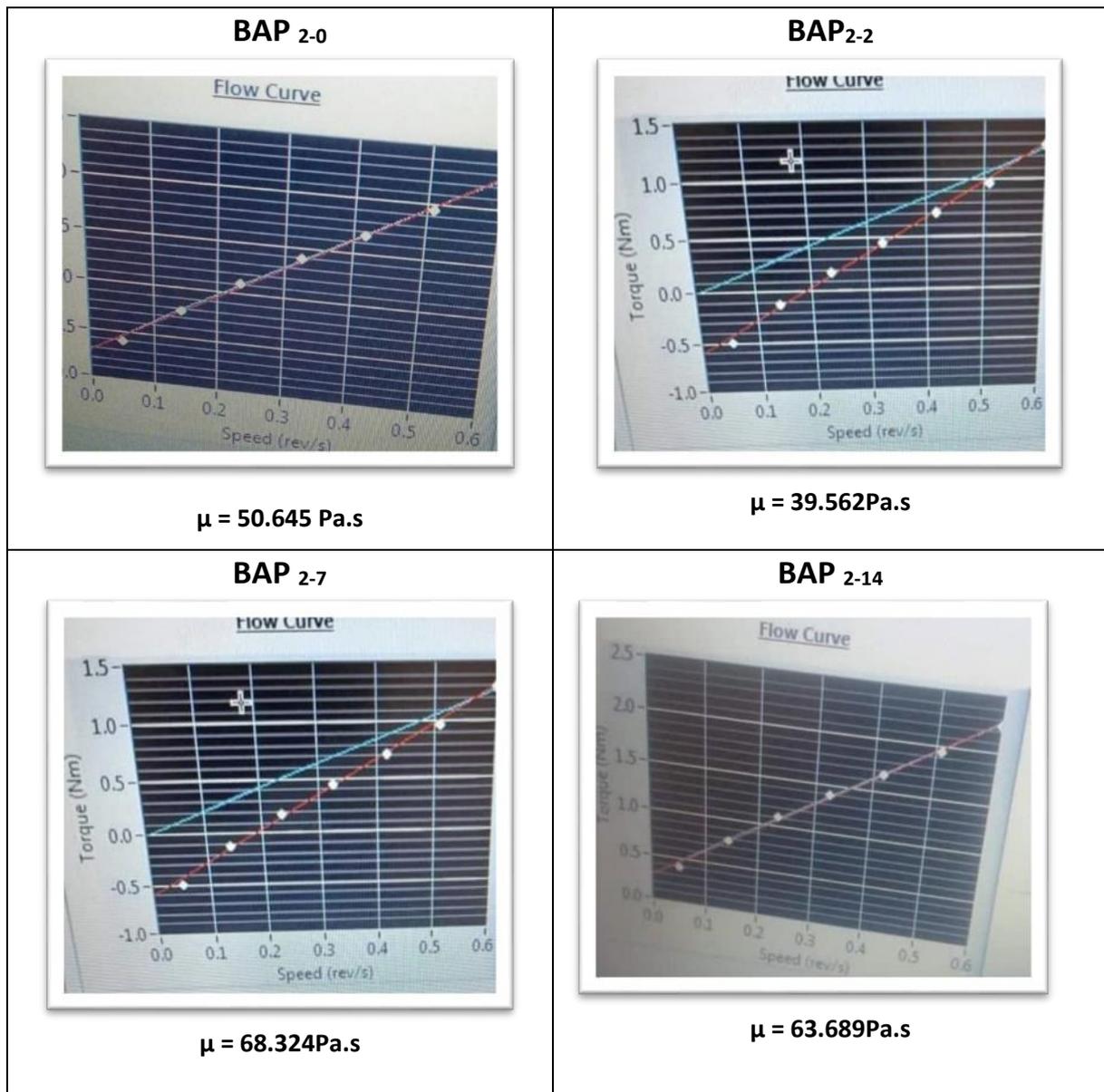


Figure 4.5. Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) pour $G/S=0,85$

Commentaires :

Le comportement des BAP montre un seuil de cisaillement très faible et une viscosité plastique plutôt élevée. Un minimum de viscosité plastique est certainement nécessaire pour éviter la ségrégation. Ainsi les BAP doivent avoir un seuil de cisaillement τ_0 inférieur à 200 Pa et une viscosité plastique μ entre 20 et 100 Pa.s.

D'après ces critères, tous nos résultats sont satisfaisants.

4.2.2 Résultats des essais à l'état durcis

4.2.2.1 Résistance à la compression

Le tableau 4.2 regroupe les résultats de l'évaluation de la résistance à la compression qui seront illustrés par la suite par des histogrammes.

Tableau 4.2: Résultats des résistances à la compression R_c

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)		
	7j	14j	28j
BAP ₁₋₀	52.19	65.06	71
BAP ₁₋₂	58.90	63.51	68
BAP ₁₋₇	54.29	64.16	69.15
BAP ₁₋₁₄	54.30	65.5	70.15
BAP ₂₋₀	59.12	65.51	70
BAP ₂₋₂	49.78	60.50	67.22
BAP ₂₋₇	52.32	61	68.17
BAP ₂₋₁₄	50.91	64.27	69.25

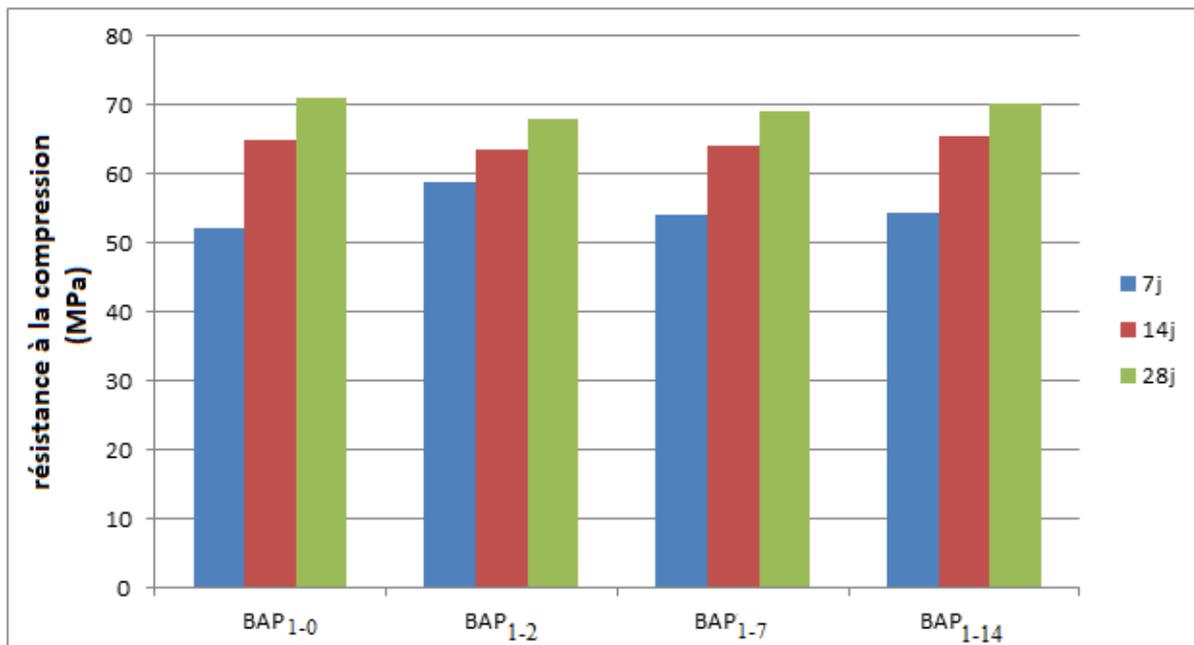


Figure 4.6. Histogrammes des résultats de la résistance à la compression (R_c) pour un $G/S=0,95$.

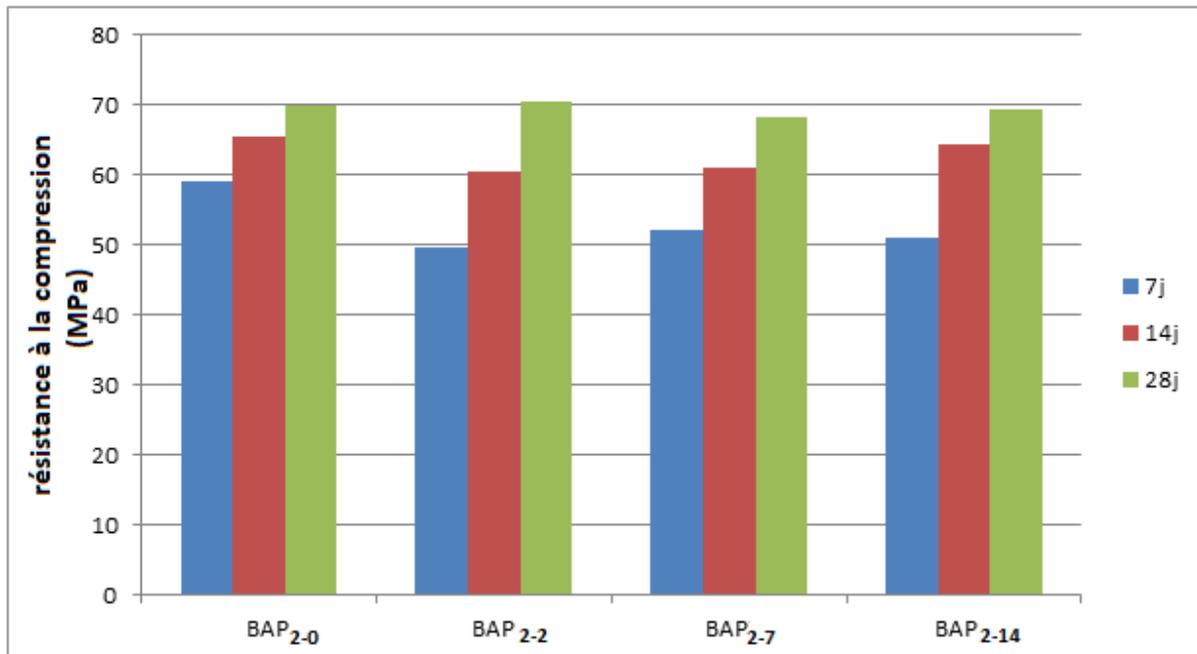


Figure 4.7. Histogrammes des résultats de la résistance à la compression (R_c) pour un $G/S=0,85$.

Commentaires

Béton Autoplaçants BAP1 : $G/S = 0,95$

Selon le Tableau 4.2 et La figure 4.4, on Remarque que le béton témoin **BAP₁₋₀** a enregistré une résistance mécanique R_c maximale à **28** jours (**71MPa**), par rapport aux autres types de bétons qui avaient marqué des résistances proches.

On Remarque aussi que le béton **BAP₁₋₁₄** a enregistré la meilleure résistance mécanique à 28 jours (**70.15MPa**) par rapport à **BAP₁₋₂** et **BAP₁₋₇**.

Béton Autoplaçants BAP2 : $G/S = 0,85$

Selon le Tableau 4.2 et La figure 4.5; on Remarque que le béton témoin **BAP₂₋₀** a enregistré une résistance mécanique R_c maximale à **28** jours (**70MPa**), par rapport aux autres types de bétons dont leurs résistances restent proches.

On Remarque aussi que le béton **BAP₂₋₁₄** a enregistré la meilleure résistance mécanique à 28 jours (**69.25MPa**) par rapport à **BAP₂₋₂** et **BAP₂₋₇**.

D'une manière générale, tous les BAPs ont marqué une résistance à la compression qualifiée comme haute et surtout pour les pourcentages forts en poudre de céramique où le

dosage en ciment est moins d'une part, et d'autre part, le rapport G/S n'a pas d'influence importante sur la résistance.

4.2.2.2 Résistance à la traction par flexion R_f

Les résultats sont résumés dans le tableau et les histogrammes ci-après :

Tableau 4.3. Résultats des résistances à la traction par flexion R_f

Type de béton	Résistance à la traction (MPa)		
	7j	14j	28j
BAP₁₋₀	6.12	7.60	7.84
BAP₁₋₂	4.014	6.45	7.04
BAP₁₋₇	4.58	6.88	7.5
BAP₁₋₁₄	5.26	6.75	7.2
BAP₂₋₀	5.10	6.50	7.60
BAP₂₋₂	5.20	6.28	7.33
BAP₂₋₇	4.30	6.14	7.11
BAP₂₋₁₄	5.90	6.30	7.41

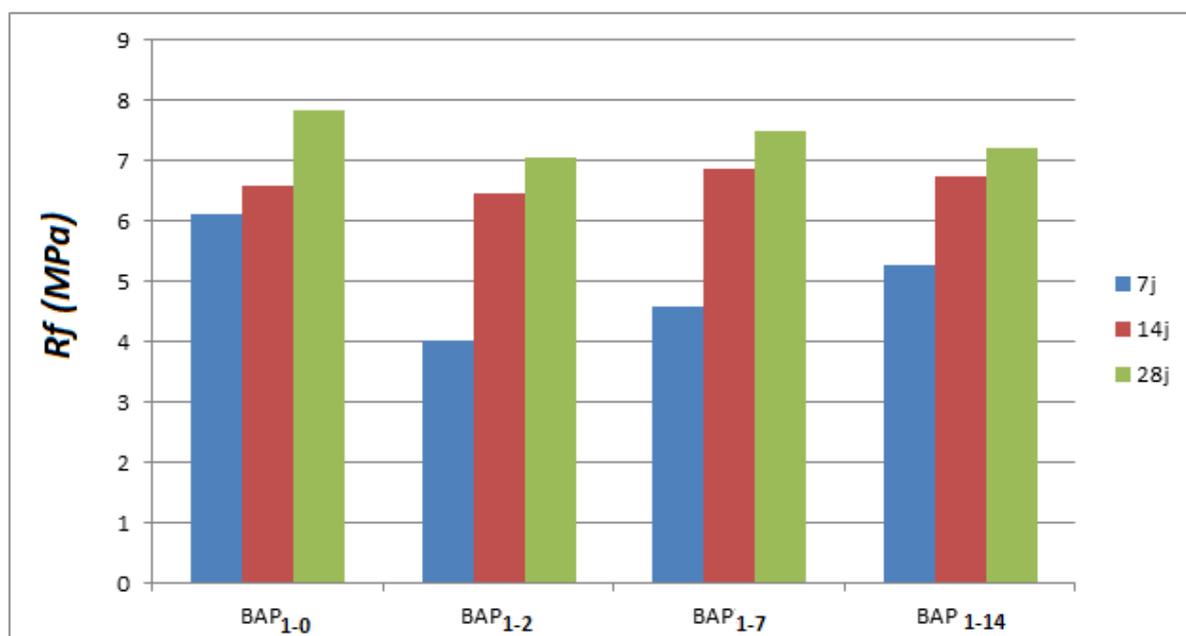


Figure 4.8. Histogrammes de résistance à la traction par flexion (R_c) pour $G/S=0,95$.

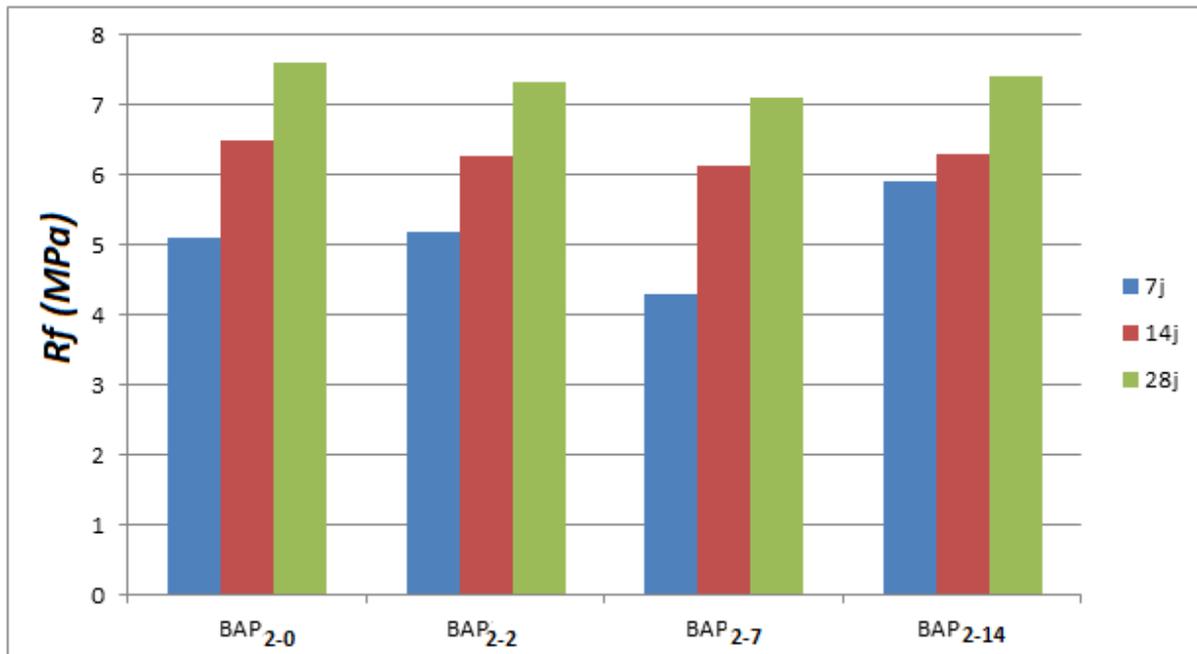


Figure 4.9. Histogrammes de la résistance R_f pour $G/S=0,85$.

Commentaires :

Béton Autoplaçants BAP1 ayant un $G/S=0,95$:

Selon le **Tableau 4.3** et **La figure 4.6**, on remarque que le béton de référence BAP1 a marqué une résistance mécanique à la traction (R_f) maximale à **28 jours (7.84MPa)** par rapport aux autres types de bétons.

Par ailleurs, le béton **BAP₁₋₇** enregistre une résistance mécanique (R_f) à 28 jours (**7.5 MPa**), une valeur proche du béton Témoin de référence où le dosage en ciment est le plus grand.

Béton Autoplaçants BAP2 ayant un $G/S=0,85$:

Selon le **Tableau 4.3** et **La figure 4.7**, on remarque que tous les BAPs testés ont marqué des valeurs très proches de celle du béton témoin.

Donc, la variation du rapport G/S et le pourcentage de la poudre de céramique n'ont pas influencé significativement la résistance à la traction R_f .

L'ajout de la poudre de céramique était très bénéfique et de grande importance.

4.3. Modélisation des résultats par plan d'expérience de type (JMP)

La modélisation va traiter les réponses enregistrées à l'état frais comme à l'état durci, dans la partie du haut, en fonction du rapport G/S ainsi que le pourcentage de la poudre de céramique.

Des expressions mathématiques de prévision sont présentées dans cette partie.

4.3.1. L'état frais

- *L'étalement (ET), Stabilité au tamis (ST), l'écoulement (L) et la viscosité (μ).*

a. Les expressions de la prévision

L'étalement (ET) :

$$ET = 0.1115631693*PC - 1.9239828697*G/S + 0.828571429*PC*G/S + 70.33640257$$

Stabilité au tamis (ST) :

$$ST = 1.880942184*PC + 7.61679411G/S + 1.25481798*PC*G/S + 0.747994811$$

L'écoulement (L) :

$$L = 0.3653105031*PC + 0.037687366G/S + 0.0021413277*PC*G/S + 0.9299571722$$

Viscosité (μ) :

$$\mu = 0.6140438972*PC + 0.215487658G/S - 0.145485478*PC*G/S + 43.05846982$$

b. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

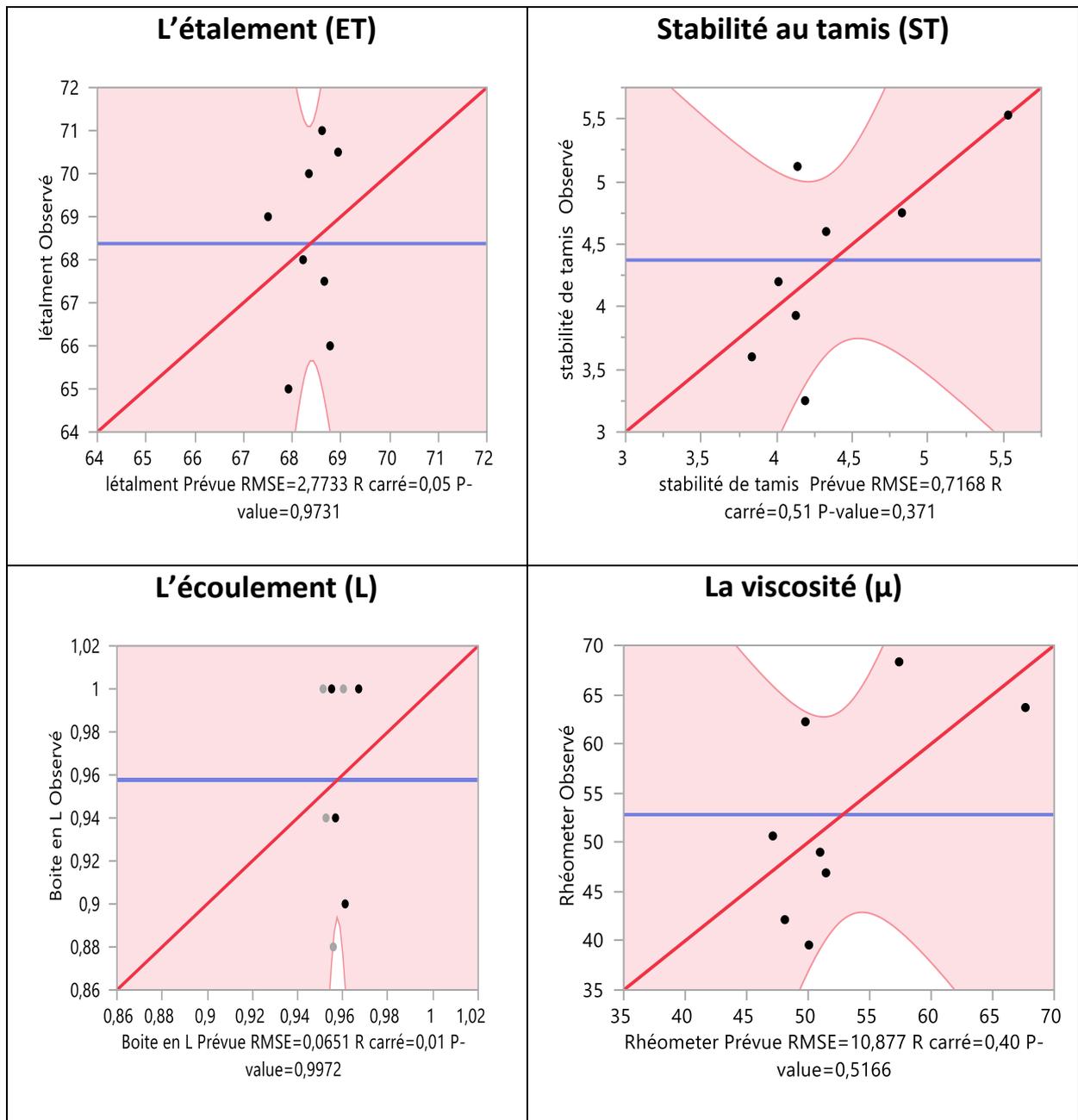
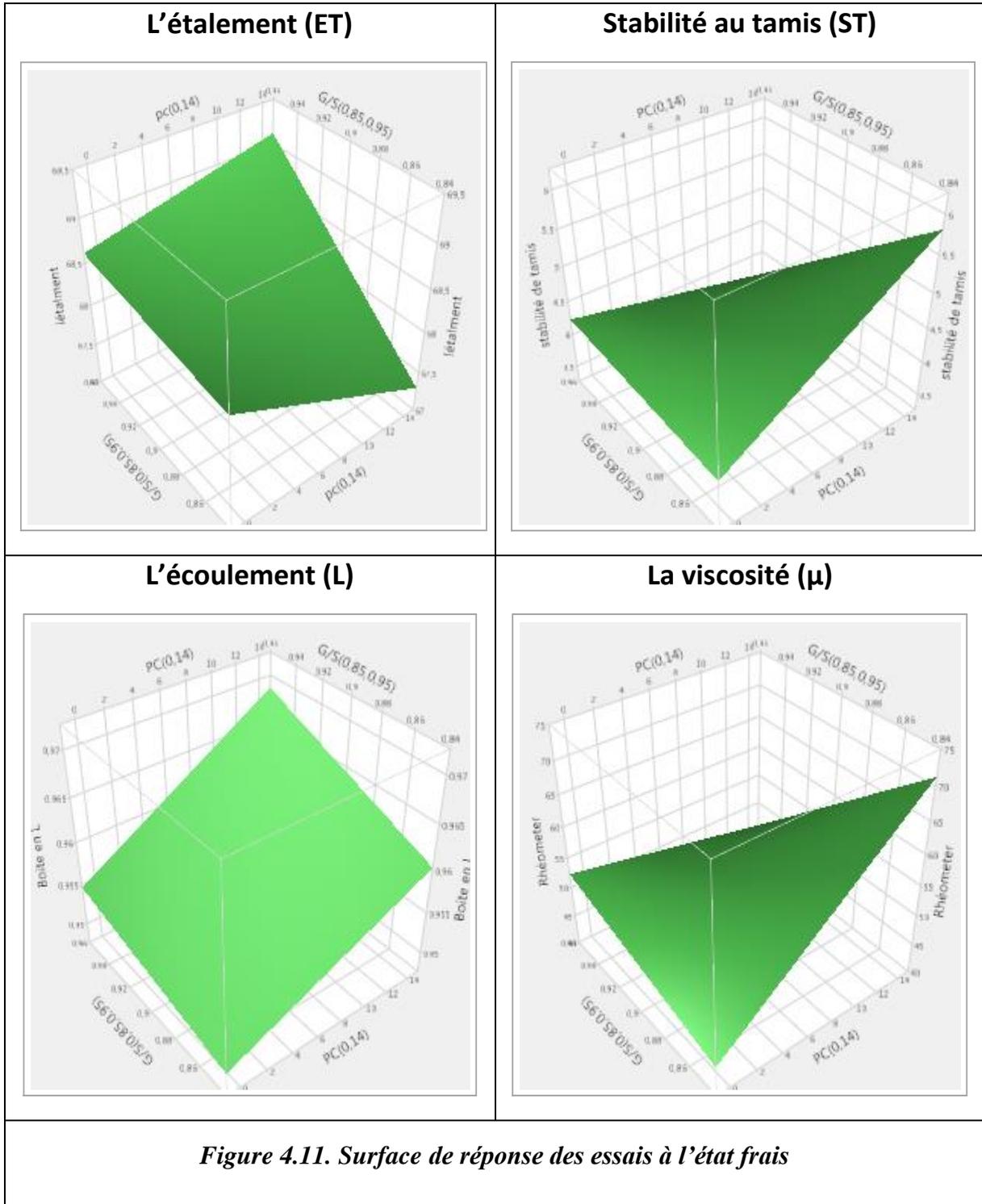


Figure 4.10. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

c. Surface de réponse



4.3.2. L'état durci

➤ Résistance à la Compression

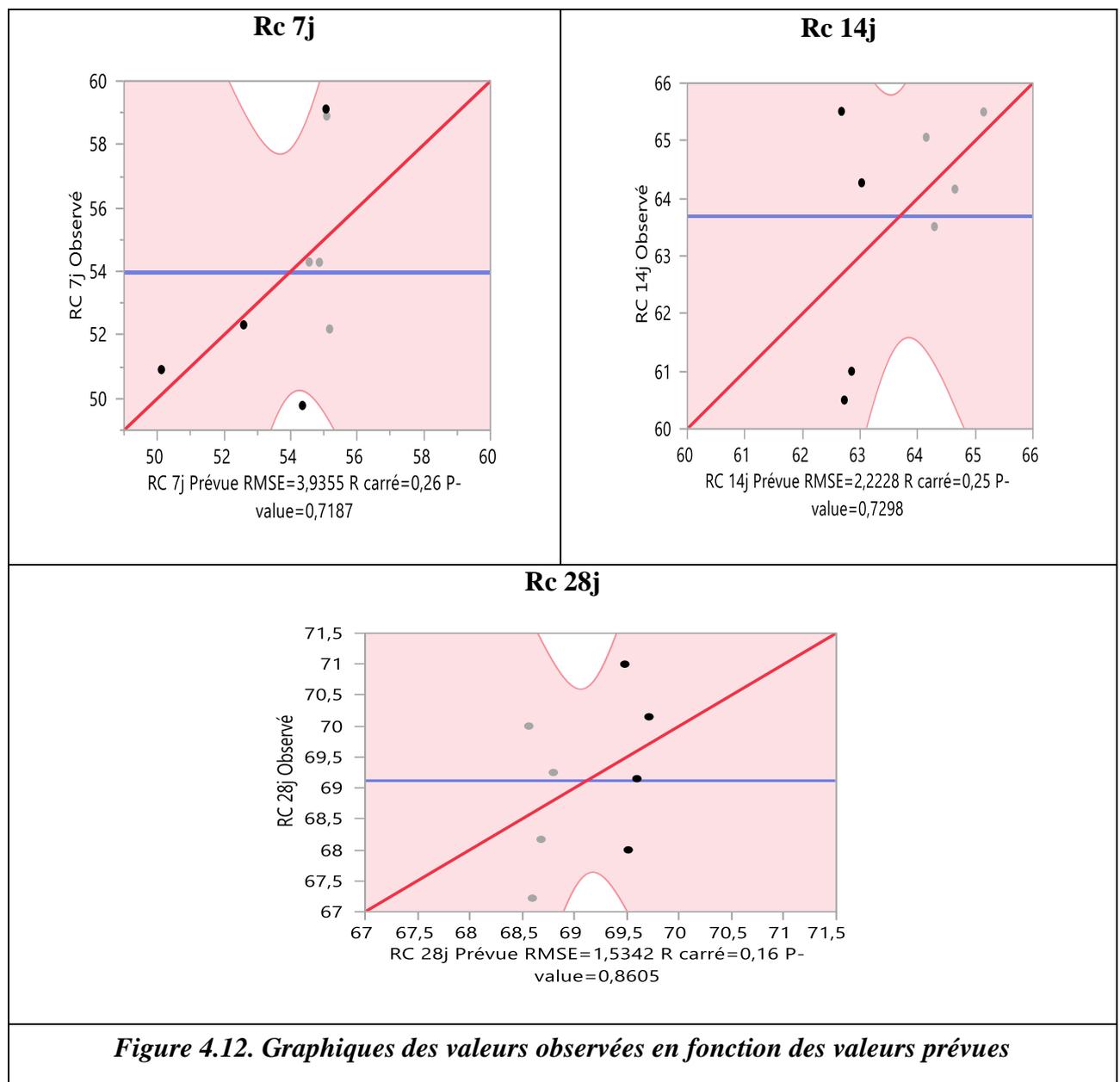
a. Les expressions de la prévision

$$R_{C7j} = 0.012854136 * PC + 0.425614824G/S + 0.052865132 * PC * G/S + 12.6754358$$

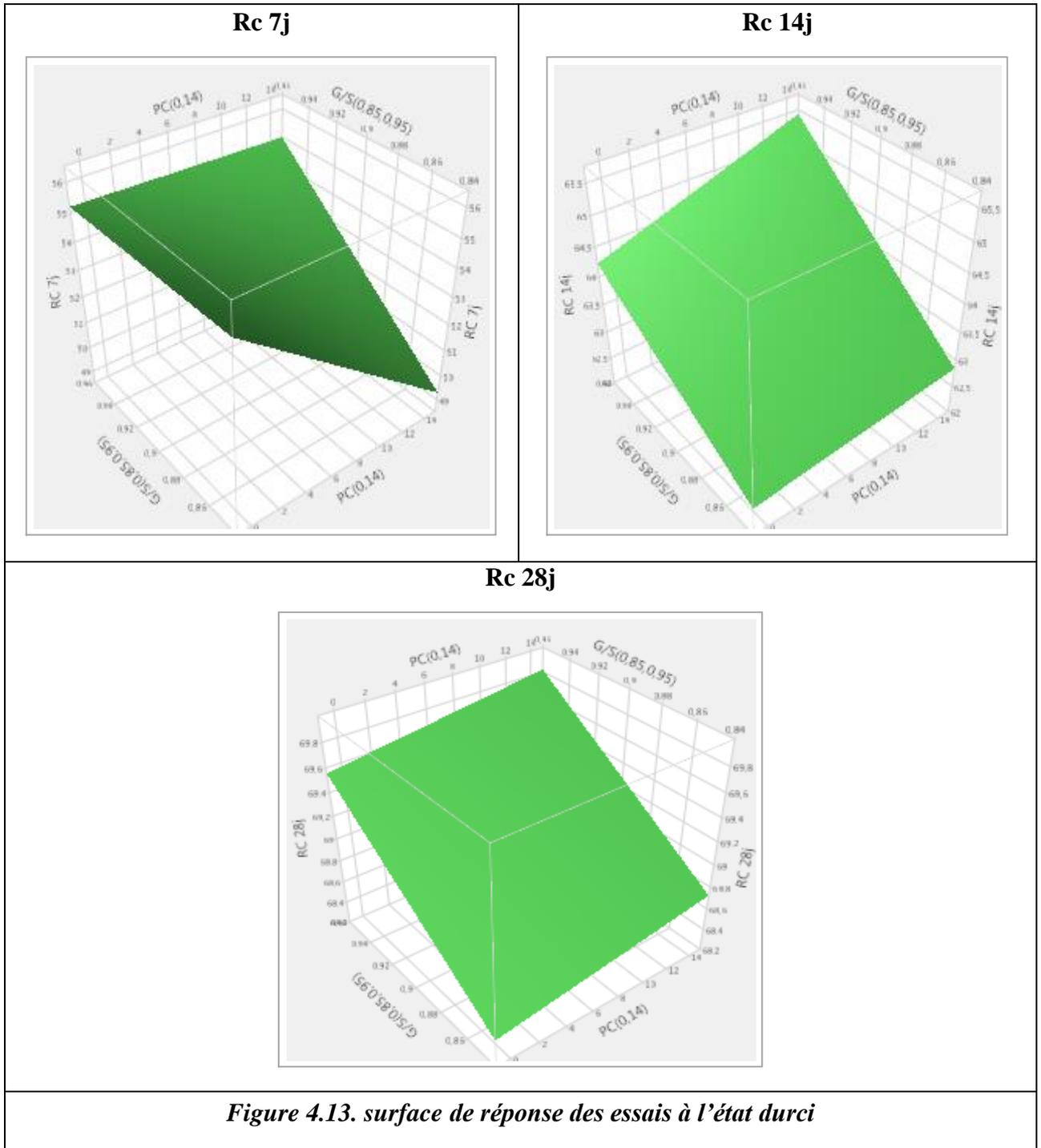
$$R_{C14j} = 0.183248651 * PC + 0.62587152G/S + 0.026892432 * PC * G/S - 14.682165874$$

$$R_{C28j} = 0.056587412 * PC + 0.285146587G/S + 0.053685214 * PC * G/S + 10.59621475$$

b. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



c. Surface de réponse



➤ Résistance à la traction par flexion R_f

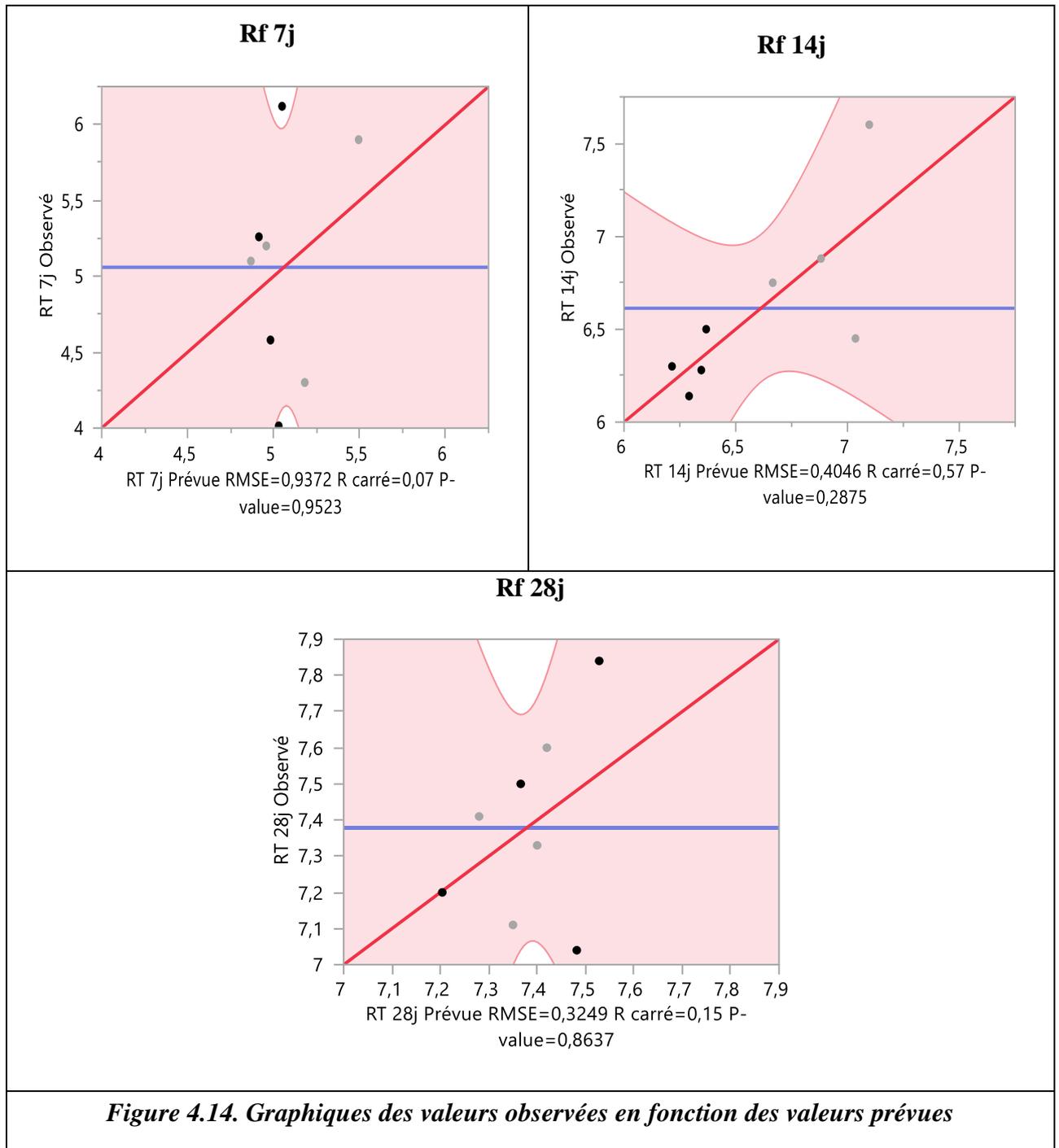
a. Les expressions de la prévision

$$R_{f7j} = 0.25451582*PC+0.458762154G/S+0.254658754*PC*G/S+5.3256548$$

$$R_{f14j} = 0.02541996*PC-0.32154965G/S+0.65231879*PC*G/S-7.63514897$$

$$Rf_{28j} = 0.053647589*PC + 0.5487213G/S - 0.21895172*PC*G/S + 6.8541458$$

b. Figure 4.12. Graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



c. Surface de réponse

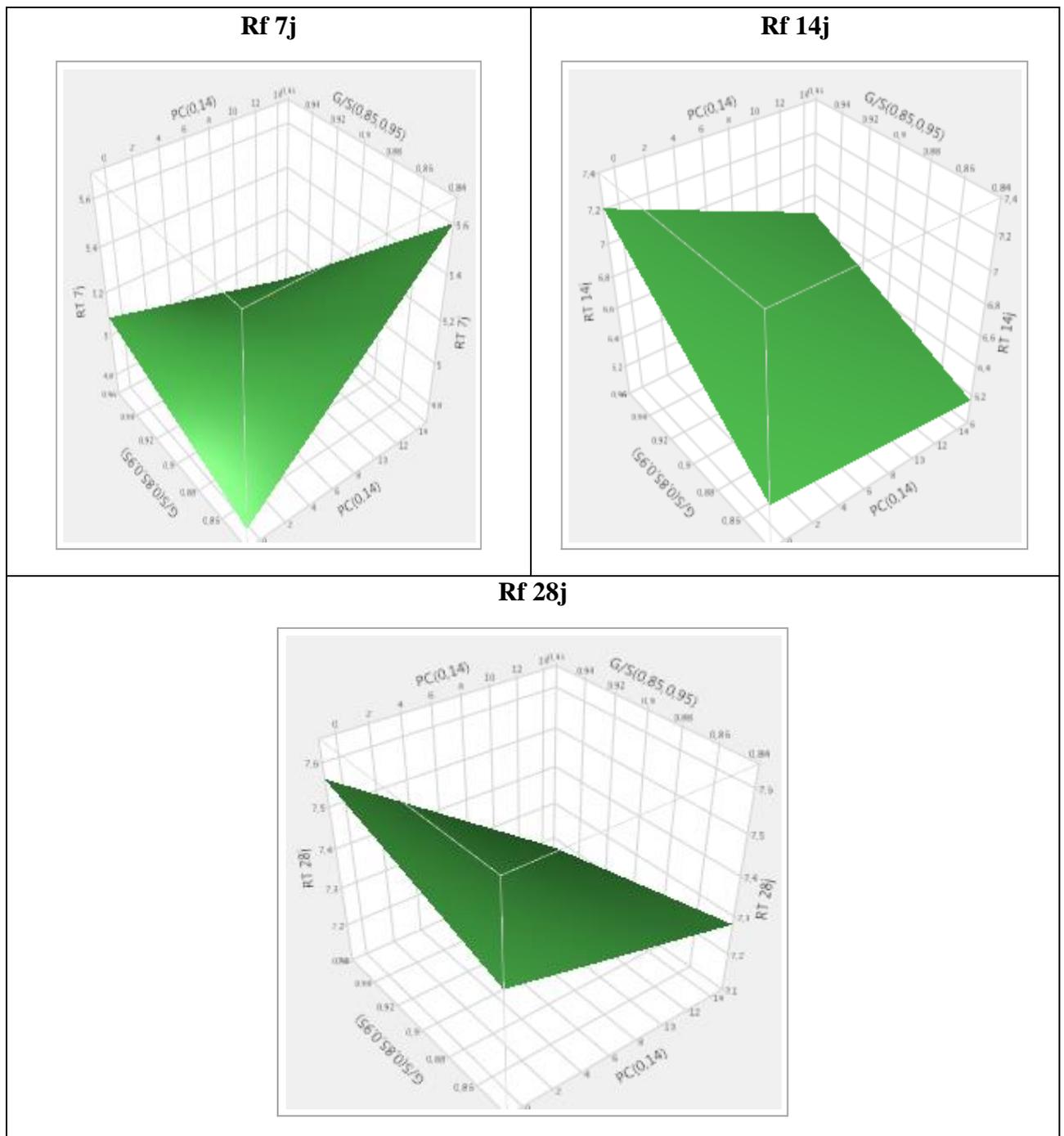


Figure 4.15. Surface de réponse des essais à l'état durci

Commentaires :

On remarque que le coefficient de corrélation R est très faible, ce qui indique la dispersion des réponses d'un mélange à un autre. On peut constater que les facteurs tels que le dosage des fines de PC sont influant sur le comportement des BAP à l'état durci. Il y'a une augmentation de la résistance à la compression à 28 j par addition de 14 % Céramique pour les deux rapports DE G/S, presque identique à celle des bétons Témoins BAP₁₋₀ et BAP₂₋₀. Les figures 4.13 et 4.15 présentent la surface de réponse des résistances mécaniques en fonction du rapport G/S et le pourcentage de céramique PC. On constate que l'augmentation du pourcentage du PC provoque l'augmentation de ces résistances.

D'une manière générale, Les coefficients de signe négatif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable associée fait diminuer la réponse et les coefficients de signe positif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable fait augmenter la réponse.

Les modèles retenus montrent bien l'intérêt de modéliser la réponse étudiée par un polynôme qui est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire toutes les expériences.

4.4 Conclusion

Les plans d'expériences sont des méthodes statistiques faisant appel à des notions mathématiques simples. Ils consistent à sélectionner et ordonner les essais afin d'identifier, à moindres coûts, les effets des paramètres sur la réponse étudiée, et par la suite de prédire les réponses sans avoir recours aux essais

La modélisation par les plans d'expériences va traiter les réponses enregistrées à l'état frais comme à l'état durci en fonction de la variation du rapport G/S ainsi que le pourcentage de la poudre de céramique et d'analyser leur influence sur la performance des BAPs étudiés.

Les expressions mathématiques de prévision proposées par le logiciel JMP utilisé, va nous permettre de prédire les réponses sans avoir recours à des essais.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette modeste recherche entre dans le cadre de valorisation de recyclage des déchets de faïences en céramique sous forme de poudre (PC) comme remplacement partiel variable de 2% ,7% et 14% de la masse de ciment, et d'étudier son effet sur la performance du béton auto plaçant à l'état frais ainsi que durci afin d'aboutir à une bonne optimisation en faisant varier le rapport G/S (0.95 et 0.85). L'analyse des résultats est déterminée à partir d'une démarche de modélisation statistique dite plans d'expérience, de type JMP.

Sur la base des résultats obtenue on conclut :

➤ **A l'état frais :**

- Tous les BAP testés ont marqué une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage, qui constituent d'ailleurs ses spécificités, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou pratiquement très faible (de 1 à 2 mm). Nous pouvons constater que l'ensemble des BAP testés, respecte les critères des essais à l'états frais exigés par AFGN.
- A son tour, la mesure de la viscosité et du seuil de cisaillement a assuré la bonne ouvrabilité de tous les mélanges testés.

➤ **A l'état durci :**

- L'utilisation de la poudre de céramique avait une influence bénéfique sur les résistances mécaniques R_c et R_f . D'une manière générale, tous les BAPs ont marqué des résistances très proches les unes des autres, qualifiées comme haute et surtout pour les pourcentages forts en poudre de céramique (BAP₁₋₁₄ et BAP₂₋₁₄) où le dosage en ciment est moins que les autres mélanges d'une part, et d'autre part, le rapport G/S n'a pas d'influence significative sur ces résistances.

Donc, on peut valoriser la réutilisation de ces déchets pour la protection de l'environnement. Et pour cela, on recommande fortement de faire la même recherche avec des pourcentages supérieurs à 14% pour réduire, le plus possible, la présence du ciment.

➤ **Au niveau de la modélisation**

Les résultats montrent également que les modèles ajustés sont de bonnes qualités et donnent des informations importantes concernant les effets de chacun des paramètres considérés ; des graphes iso réponses, traduisant en courbes les modèles mathématiques trouvés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Baudouin M. AISSOUN, « étude de l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée » Mémoire de maîtrise de l'université du SHERBROOKE, (Québec) Canada, Juillet 2015.
- [2] GHERNAOUT Fatma « L'influence des ajouts des fillers calcaires sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2015.
- [3] Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre, 2006.
- [4] Benaddad. S, Benatsou. N, « Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) ». Mémoire de master université de bejaia, 2012.
- [5] BRAHIM.N, « Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autobloquants ». Mémoire de magister. Université de Mohamed Khider –Biskra, 2006.
- [6] TAGNIT-HAMOU.A, « Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons ». Notes de cours. Université de Sherbrooke. GCI-712. 1995.
- [7] Hanaa Fares. Thèse de doctorat en Génie Civil « Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009
- [8] A.M. NEVILLE : « Propriétés des bétons ». Version française traduit par CRIB. Eyrolles. 2000.
- [9] BAALBAKI.M, « Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants ». Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [10] Association Française de Génie Civil « AFGC », Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, p63, Juillet 2002.
- [11] SAMOUH. H, ROZIERE.E, LOUKILI.A, « Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP) ». XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [12] CHEKROUNMathieu, 2008 « Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface»Thèse de Doctorat,école Centrale de Nantes.
- [13] J.S. Popovics,sino dato« Determination of elastic constants of a concretespecimenusingtransientelasticwaves» Thèse de Doctorat, sino loco.

- [14] Auscultation sonore : Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton » P18-418 ,1989
- [15] F.Gabryszak, sino dato« Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux
- [16] GOUPY Jacques « Introduction aux Plans d'expériences ». Dunod. Paris. 303pages. (2001).
- [17] BOX George.E. P., HUNTER William G., HUNTER J. Stuart «Statistics for Experimenters» deuxièmeédition. John Wiley and Sons. New-York. 633pages. (2005).
- [18]M.Vigier, pratique des plans d'expériences : méthodologie taguchi .les éditions d'organisation, 1998
- [19] technique de l'ingénieur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/>].
- [20] BOUKLI HACENE S. M. A., « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCCEN » Thèse de Doctorat à l'université de Tlemcen, Janvier 2009, 193p