

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

UNIVERSITÉ AMMAR TELIDJI DE LAGHOUAT

Faculté de Technologie



Département de Génie Civil

MÉMOIRE DE MASTER

Option : MATRIAUX DES CONSTRUCTION

THEME :

***Etude de la Relation rhéologie-ségrégation
des bétons à l'état frais***

Présenté par :

OUSSAMA RABHALLAH

CHAFIK NEFNAF

Devant le jury composé de

Mr. BELAIDI Akram Salah Eddine	MCA,	Université de Laghouat	Président
Mme. MARGOUB Messaouda	MAA,	Université de Laghouat	Examinatrice
Mr. BOUZIANI Tayeb	MCA,	Université de Laghouat	Encadreur
Mr. SAHRAOUI Mohammed	Doctorant,	Université de Laghouat	Co-Encadreur

Année Universitaire 2016/2017

Dédicaces

A ceux qui j'aime le plus au monde : ma mère et à mon père et à ma grande mère ; A mes frères ; A mes tantes, oncles, cousines et cousins ; à toute la famille Rabhallah et nos proches ; à tous mes amis ; à tous les membres de bridge club et tous les collègues de ma promo de matériaux de construction à l'université de laghouat.

Oussama rabhallah et Chafik nefnaf

Remerciements

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

*Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur Mr. **Bouziani Tayeb** et Co-encadreur Mr. **Sahraoui Mohammed** qui nous ont témoigné de leur confiance, de leur aide scientifique et par leurs expérience et compétence.*

*Nous remercions les membres de jury Mr. **Belaidi Akram Salah Eddine** et Mme. **Marghoub Messaouda**, qui ont accepté de juger ce travail. Nous remercions aussi tous nos amis pour leur aide, leur patience, leur compréhension et leur encouragement.*

*Et sans oublier tous les membres du club scientifique **BRIDGE** qui nous ont donné le plus de courage pour finir ce travail.*

ملخص

هذا العمل التجريبي يتمثل في دراسة علاقة الريولوجيا و ترسب الخرسانة في الحالة الرطبة. درسنا تأثير عناصر الخلط (نسبة الحصى/الرمل, نسبة الماء/الاسمنت, نسبة حصى 8-15/3-8, كمية الملدن عالي التأثير وكمية مسحوق الرخام) لغرض إيجاد علاقة بين ريولوجيا الخرسانة ذاتية التوضع وظاهرة الترسب الخرساني.

إن تطبيق طريقة المخططات التجريبية مكننا من الحصول على نماذج رياضية لتأثير عناصر الخلط المختلفة. على خصائص الخرسانة ذاتية التوضع.

لقد وجدنا توافق مقبول بين بعض تجارب قياس الترسب الخرساني والخصائص الريولوجية للخرسانة ذاتية التوضع مما يسمح لنا بتوقع ظاهرة الترسب في الخرسانة ذاتية التوضع من خلال خصائصه الريولوجية.

Résumé

Ce travail expérimental présente une étude de la relation rhéologie-ségrégation dans les bétons frais. Nous avons étudié l'influence des paramètres de composition (rapports G/S, E/C, G1/G2, dosage de Sp et poudre de marbre) afin de trouver une relation entre la rhéologie et la ségrégation des BAP.

Une méthode basée sur le plan d'expérience nous a permis de visualiser graphiquement l'effet de chaque paramètre sur les propriétés des BAP.

Les résultats trouvés montrent qu'il existe une bonne corrélation entre la rhéologie et les résultats de quelques essais de stabilité statique, ce qui nous permet d'avoir une idée sur la stabilité des BAP à partir de leurs paramètres rhéologiques.

Abstract

This experimental work presents a study on the effects of mix-design parameters (W/C, G/S and G1/G2 ratio, Sp and Marble Powder contents) to find a relation between rheological parameters and static stability of self-compacting concrete.

The design of experiments approach leads to find mathematical models relating the stability and rheological parameters as function of different mix-design parameters. We found a good correlation between some results of static stability tests and SCC rheological parameters.

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
ملخص.....	iii
Résumé.....	iii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux.....	x
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Rhéologie des bétons à l'état frais	3
1.1 Introduction	3
1.2 Importance de l'étude rhéologique.....	3
1.3 Paramètres rhéologiques	4
1.3.1 Viscosité	4
1.3.2 Seuil de cisaillement.....	4
1.3.3 Vitesse de cisaillement	5
1.3.4 Contrainte de cisaillement	5
1.3.5 Thixotropie	6
1.4 Différents comportements rhéologiques	7
1.4.1 Fluides newtoniens	8
1.4.2 Fluides non-newtoniens	8
1.5 Modèles rhéologiques	10
1.5.1 Modèle de Newton.....	10

1.5.2	Modèle de Bingham.....	11
1.5.3	Modèle de Herschel-Bulkley	11
1.6	Méthodes de caractérisation de la rhéologie	11
1.7	Facteurs affectant la rhéologie des bétons.....	15
1.7.1	Effet du rapport eau-ciment	15
1.7.2	Effet du type de ciment.....	16
1.7.3	Effet des adjuvants.....	16
1.7.4	Effet du temps.....	17
1.7.5	Effet de la température	18
1.7.6	Influence de la poudre de marbre	19
Chapitre 2 : Mécanismes de ségrégation des bétons		21
2.1.	Introduction	21
2.2	Description de la ségrégation du béton frais	21
2.3	Les mécanismes de ségrégation	21
2.3.1	Ségrégation dynamique	22
2.3.2.	Ségrégation statique.....	24
2.4	Les essais de ségrégation statique des BAP	25
2.5	La résistance à la ségrégation.....	30
2.6	Paramètres influant sur la ségrégation	30
2.6.1	Influence des additions minérales.....	30
2.6.2	Influence du rapport gravillon/sable (G/S).....	31
2.6.3	Influence du diamètre maximal	31
2.6.4	Influence de l'adjuvant	32
2.6.5	Influence de la pâte de ciment	32
2.6.6	Influence du rapport eau sur ciment (E/C)	32
Chapitre 3 : Matériaux et méthodes.....		34
3.1	Introduction	34

3.2 Méthode de plan d'expériences.....	34
3.2.1 Introduction	34
3.2.2 Notion d'espace expérimental.....	34
3.2.3 Plan pour surface de réponse (plan composite).....	37
3.2.4 Modélisation mathématique	41
3.3 Essais de caractérisation des matériaux utilisés	42
3.3.1 Méthodes et procédures d'essais	42
3.3.2 Résultats des essais de caractérisation des matériaux.....	52
Chapitre 4 : Résultats et interprétations.....	61
4.1. Introduction	61
4.2. Préparation de l'étude	61
4.2.1 Choix des réponses	61
4.2.2 Choix des facteurs	62
4.2.3 Définition des niveaux des facteurs.....	62
4.3. Résultats des essais.....	63
4.3.1. Modèles mathématiques.....	65
Conclusion Générale.....	76
Recommandations.....	77
Annexe	78
A.1. Etapes d'analyse avec le logiciel JMP	78
A.2. Graphiques des réponses (Valeurs prévues en fonction de celles Observées) .	81
A.3. Photos de quelques essais.....	83
A.4. Formulation de la composition du centre (Feuille Excel)	86
A.5. Fiche technique du ciment.....	87
A.6. Fiche technique du superplastifiant.....	88
Références bibliographiques.....	89

Liste des figures

Chapitre1

Figure.1. 1. Courbe d'écoulement d'un fluide Binghamien [Ferraris, 1999].	4
Figure.1. 2. Contribution de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au Cisaillement du béton [De Larrard, 2002].	5
Figure.1. 3. Schéma de vitesse de cisaillement [De Larrard, 2002].	5
Figure.1. 4. Exemples des courbes d'écoulement[belaidi,2013].	6
Figure.1. 5. Phénomènes thixotrope et anti thixotrope [Hu, 1995].	7
Figure.1. 6. Schéma de principe du comportement d'un fluide à seuil thixotrope [Mahaut et al. 2009].	7
Figure.1. 7. Les comportements rhéologiques des fluides [Mahaut et al. 2009].	8
Figure.1. 8. Two point test Rhéomètre [Tattersall et Bloomer, 1979].	12
Figure.1. 9. BML Viscometer [Wallevik et Gjov, 1990].	12
Figure.1. 10. BT Rhéom de type plan-plan [Hu, 1995].	13
Figure.1. 11. Rhéomètre Cemagref [Coussot, 1992].	14
Figure.1. 12. Rhéomètre IBB[Beaupré, 1994].	14
Figure.1. 13. (a) Le rhéomètre du LGCGM et, (b) le rhéomètre ICAR [Koehler et Fowler, 2004].	15
Figure.1. 14. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [Domone and al, 1999].	16
Figure.1. 15. Variation du Seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction du temps, confectionnée avec différents types de superplastifiant [Bjömström et Chandr., 2003].	17
Figure.1. 16. Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps.	18
Figure.1. 17. Variation du seuil 'écoulement en fonction de la température et le dosage en ciment.	19
Figure.1. 18. Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en ciment.	19
Figure.1. 19. Effet de la poudre de marbre sur la viscosité du béton de sable auto-plaçant.	20

Chapitre 2

Figure.2. 1.Procédure d'essai de la Boite en L	22
Figure.2. 2.Risque de blocage au droit des armatures.	23
Figure.2.3.Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton. .	25
Figure.2. 4.Essai de la stabilité au tamis.	26
Figure.2. 5.Essais à la colonne.....	27
Figure.2. 6.Les différentes étapes de l'essai de mesure de l'indice de ségrégation statique.	28
Figure.2. 7.Essai de stabilité au cylindre.	29

Chapitre 3

Figure.3. 1.Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.	35
Figure.3. 2 .Espace expérimental pour deux facteurs.	35
Figure.3. 3 .Représentation d'une réponse dans un espace expérimental.	36
Figure.3. 4. Domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	36
Figure.3. 5. Surface de réponse formée par les points expérimentaux.	37
Figure.3. 6. Exemple d'une représentation schématique d'un plan composite avec deux facteurs.	38
Figure.3. 7. Equipement nécessaire de l'essai.	42
Figure.3. 8. Equipement nécessaire de l'essai perméabilité Blaine.	43
Figure.3. 9. Schéma d'un perméabilimètre de Blaine à mesure manuelle.....	44
Figure.3. 10. Essai d'équivalente de sable.	45
Figure.3. 11. Série de tamis de l'analyse granulométrique.....	46
Figure.3. 12. Moule et dame pour coefficient d'absorption.	47
Figure.3. 13. Géométrie et dimensions du rhéomètre.....	48
Figure.3. 14. Profil de vitesse utilisé.....	51
Figure.3. 15. Photo de sac du ciment nous utilisé.....	53
Figure.3. 16. Diffractogrammes aux rayons X du sable alluvionnaire utilisés.....	54
Figure.3. 17. Courbe granulométrique de sable utilisé.	54
Figure.3. 18. Diffractogrammes aux rayons X de la poudre de marbre.....	56

Figure.3. 19. masse volumique absolue.....	57
Figure.3. 20. la masse volumique apparent.....	57
Figure.3. 21. Courbe granulométrique de gravier 3/8 utilisé.....	58
Figure.3. 22. Courbe granulométrique de gravier 8/15 utilisé.....	58
Figure.3. 23. Procédure de malaxage du béton autoplaçant.	60
Figure.3. 24. Photos Malaxeur utilisé.	60

Chapitre 4

Figure.4. 1. Etalement, en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20% ; SP=1%).....	68
Figure.4. 2. Variation de T50 en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%).....	69
Figure.4. 3. Variation de Sc, en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%).....	70
Figure.4. 4. Variation de la stabilité ISS , en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%).....	71
Figure.4. 5. Variation de la stabilité au tamis Pi en (%), en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%).....	71
Figure.4. 6. Variation de seuil de cisaillement Tau en (Pa), en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%).....	72
Figure.4. 7. Variation de la Viscosité plastique Vp en (Pa.s), en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%).....	73
Figure.4. 8. corrélation entre Tau et Sc.....	74
Figure.4. 9. Corrélation entre Vp et Pi	75

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau.1. 1. Modèles de comportement rhéologique des fluides.....	10
--	----

Chapitre 3 :

Tableau.3. 1. Valeurs de k (Goupy, 2006).....	39
Tableau.3. 2. Nomenclature des paramètres.	49
Tableau.3. 3. Exigences chimiques.....	52
Tableau.3. 4. Exigences minéralogiques.....	53
Tableau.3. 5. Résultats d'essais de caractérisation de ciment..	53
Tableau.3. 6. Propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre.	55
Tableau.3. 7. Propriétés physiques des granulats.	57

Chapitre 4 :

Tableau.4. 1. Niveaux des facteurs retenus.....	62
Tableau.4. 2. Proportions et résultats d'essais.	63
Tableau.4. 3. Résultats des essais.	64
Tableau.4. 4. Coefficients et paramètres des modèles des réponses (en valeurs codées).	66
Tableau.4. 5. Analyse de la variance des réponses.	67
Tableau.4. 6. Valeurs de l'ajustement Tau et Sc.....	74
Tableau.4. 7. Valeurs de l'ajustement Vp et Pi.....	75

Introduction générale

La maîtrise de la stabilité statique (ségrégation) des bétons à l'état frais est une étape essentielle pour assurer une meilleure mise en place du béton, avoir de bonnes résistances mécaniques et par conséquent, garantir une bonne durabilité des structures à long terme. Le phénomène de ségrégation est plus prononcé dans les bétons fluides, tel que les bétons autoplaçants (BAP). Les BAP se caractérisent par une grande fluidité et une bonne stabilité vis-à-vis la ségrégation. Les propriétés à l'état frais, tel que la fluidité et ségréabilité des BAP peuvent-être caractérisées par des essais empiriques tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement T50 (pour caractériser la fluidité) et l'essai de stabilité au tamis, l'essai de stabilité à la colonne, l'essai de stabilité au cylindre (pour caractériser la ségrégation statique à l'état frais) et Les propriétés rhéologiques se caractérisent à l'aide d'un rhéomètre. Le comportement des BAP à l'état frais peut être décrit d'une manière plus précise par l'utilisation des rhéomètres. Les rhéomètres donnent la relation entre la contrainte au cisaillement et la vitesse de cisaillement, ce qui va permettre de déterminer (à l'aide d'un modèle rhéologique) les paramètres rhéologiques (viscosité plastique et seuil de cisaillement).

Notre travail consiste, en première étape, d'étudier l'effet des paramètres de formulation (tel que : le rapport gravier/sable (G/S), le rapport gravier (3/8)/gravier (8/15) (G1/G2), le rapport de poudre de marbre/ciment (MP/C), le rapport eau/ciment (E/C) et le dosage du superplastifiant (SP), sur la fluidité (mesurée par l'étalement au cône d'Abrams et le temps d'écoulement T50), sur la stabilité statique à l'état frais (l'essai de stabilité au tamis, l'essai de stabilité à la colonne, l'essai de stabilité au cylindre) et sur le comportement rhéologique des BAP à l'état frais (viscosité plastique et seuil de cisaillement).

Afin de réaliser cette étape, nous avons formulé 31 mélanges en utilisant sur une approche statistique basée sur les plans d'expériences (par l'utilisation du logiciel statistique JMP7). L'application de cette approche a permis d'établir des modèles mathématiques donnant les propriétés à l'état frais en fonction des paramètres de formulations.

En deuxième étape on vise d'établir d'éventuelles corrélations entre les paramètres rhéologiques et les résultats de stabilité des BAP à l'état frais.

Ce mémoire propose est organisé en quatre chapitres :

Les deux premiers chapitres représentent une recherche bibliographique sur la rhéologie des bétons à l'état frais et les mécanismes de ségrégation des bétons.

Le premier chapitre décrit l'importance de l'étude rhéologique des bétons à l'état frais, les différents paramètres et comportements rhéologiques, les modèles rhéologiques, les méthodes de caractérisation de la rhéologie et les facteurs influant la rhéologie des bétons à l'état frais.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents mécanismes de ségrégation des bétons à l'état frais, notamment celle des BAP. Nous avons décrit les différents essais de caractérisation de la ségrégation ainsi que les paramètres influant la ségrégation des BAP.

La partie expérimentale est constituée de deux chapitres : le chapitre 3 est consacré à la caractérisation des matériaux et des méthodes utilisés dans notre travail et le quatrième chapitre dédiés à la présentation des résultats des essais et des modèles trouvés.

Enfin, nous donnons une conclusion générale, nous donnons une annexe et nous citons une liste des références bibliographiques.

Chapitre 1 : Rhéologie des bétons à l'état frais

1.1 Introduction

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement d'un mélange. Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement et viscosité plastique) qui permettent de tracer des courbes d'écoulement caractéristiques des différents types de mélanges [Courrazé et Grossiord, 1983]. L'étude des phénomènes physiques mis en jeu, dans l'étude des écoulements des mortiers et bétons revêt une importance particulière dans le domaine de la rhéologie. De telle approche, a pour but d'expliquer et d'analyser les propriétés rhéologiques macroscopiques du béton frais à partir du comportement des phases constitutives. L'organisation de ces différentes phases telles que la viscosité du fluide suspendant, la forme et la taille des grains solides ainsi que leurs activités régissent le comportement rhéologique global de l'écoulement des matériaux cimentaires.

1.2 Importance de l'étude rhéologique

Bien que les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton peut ne pas être mis en place correctement, ses propriétés désirées ne seront pas obtenues. Pour chaque application, les caractéristiques requises pour le béton frais sont différentes et définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais telles que les besoins de finition, de mise en place, de pompabilité, de résistance à la ségrégation etc... Aujourd'hui, le développement des nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. De nombreux ajouts cimentaires et adjuvants organiques ont fait leur apparition et viennent apporter des modifications importantes au béton. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même coup une importance primordiale. Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé aux problèmes de ségrégation et une faible résistance à la compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide ayant d'excellentes propriétés mécaniques par l'utilisation des superplastifiants. Les tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais. Le développement de nouveaux appareils basés sur une approche plus fondamentale donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids.

1.3 Paramètres rhéologiques

1.3.1 Viscosité

La viscosité est la résistance à l'écoulement de la matière, elle est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1-1)$$

Elle correspond à la pente de la droite donnant la variation du gradient de vitesse de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement (Figure.1. 1). La viscosité plastique dépend de la force intermoléculaire qui empêche le déplacement des particules les unes par rapport aux autres et rend l'écoulement plus difficile [Charbel, 2008].

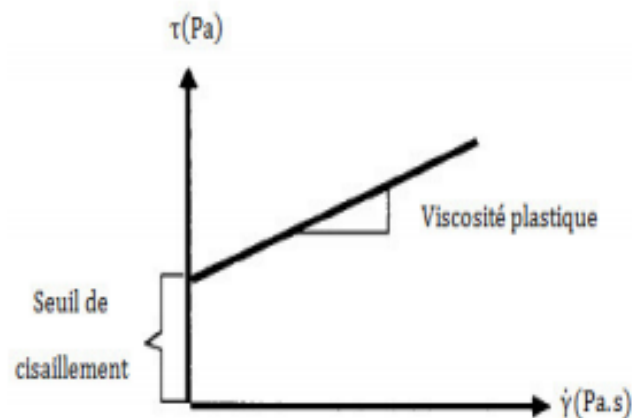


Figure.1. 1. Courbe d'écoulement d'un fluide Binghamien [Ferraris, 1999].

1.3.2 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est défini comme la contrainte de cisaillement au-delà de laquelle le matériau devient fluide, Alors que la viscosité plastique est connue comme la résistance à l'écoulement de la matière. De Larrard [2002] a donné une explication physique plus concluante. En effet, cet auteur a montré que le seuil de cisaillement est contrôlé par les contacts inter-granulaires, c'est-à-dire par la phase solide du béton, pendant que les termes μ , $\dot{\gamma}$ représentent la contribution de la phase liquide (Figure.1. 2).

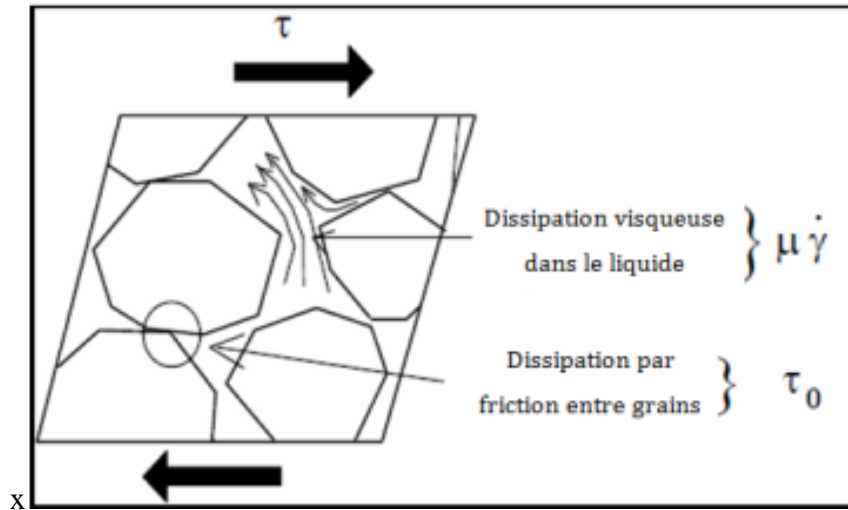


Figure.1. 2. Contribution de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au Cisaillement du béton [De Larrard, 2002].

1.3.3 Vitesse de cisaillement

Souvent appelé gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ il s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives de matériau cisailé, qui représente donc la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles, emprisonné entre deux plans parallèles de surface S (séparés d'une distance dz). Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance dx à une vitesse constante de norme V_0 (Figure.1. 3).

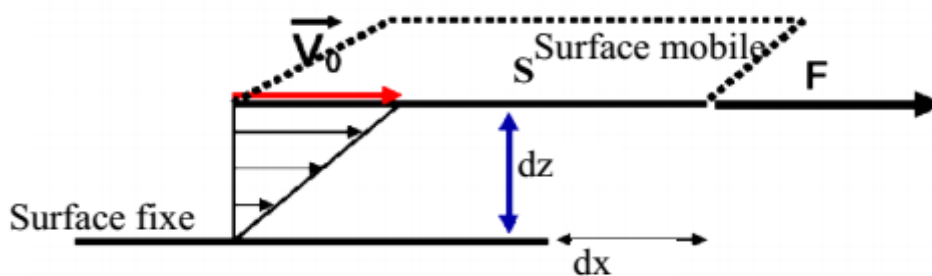


Figure.1. 3. Schéma de vitesse de cisaillement [De Larrard, 2002].

1.3.4 Contrainte de cisaillement

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contrainte τ (mesurée en Pascal), qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche cisailée [Poitou et Racineux, 2001]. Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide, selon la formule suivante:

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1-2)$$

Où: dF - projection de la force de frottement tangentielle et dS - surface élémentaire d'une couche cisillée.

1.3.5 Thixotropie

Après avoir dépassé le seuil de cisaillement, le matériau commence à s'écouler. Si l'effort nécessaire pour maintenir un écoulement constant diminue en fonction du temps (ou si l'écoulement s'accélère en fonction du temps à effort constant), ce matériau est dit *thixotrope*. Si le matériau thixotrope subit un cisaillement constant après un temps de repos, on observe un comportement analogue à celui décrit sur la Figure.1. 4 (c). Ainsi que l'anti-thixotropie, sont définies comme étant des phénomènes réversibles (Figure.1. 5). Le schéma du principe du comportement d'un fluide thixotrope est donné dans la Figure.1. 6

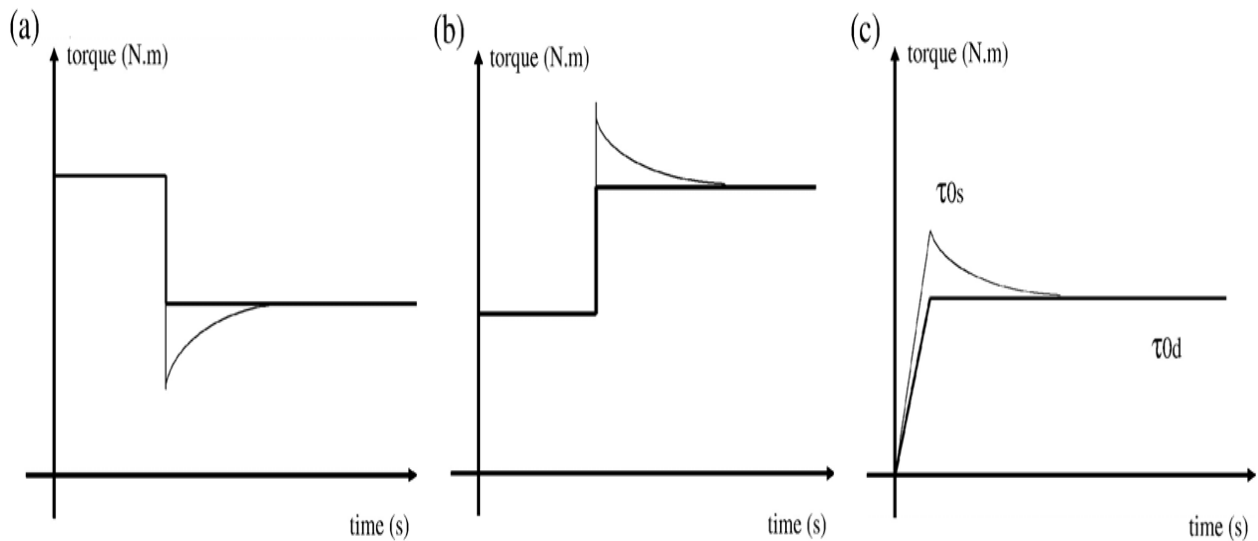


Figure.1. 4. Exemples des courbes d'écoulement [belaidi, 2013].

- (a) diminution de la vitesse de rotation ;
- (b) augmentation de la vitesse de rotation ;
- (c) augmentation de la vitesse de rotation après une période de repos.

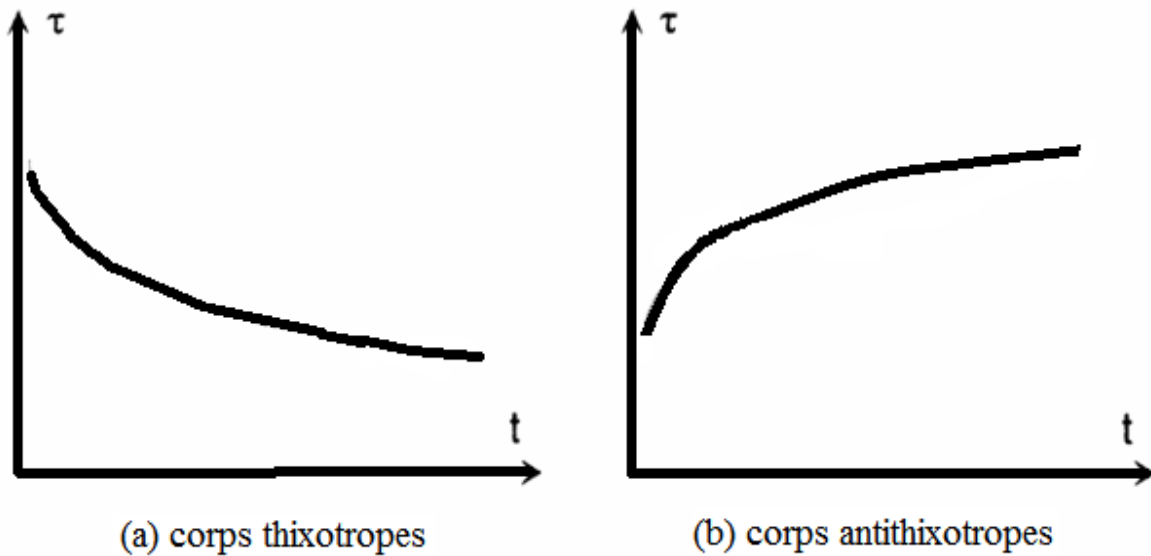


Figure.1. 5. Phénomènes thixotrope et anti thixotrope [Hu, 1995].

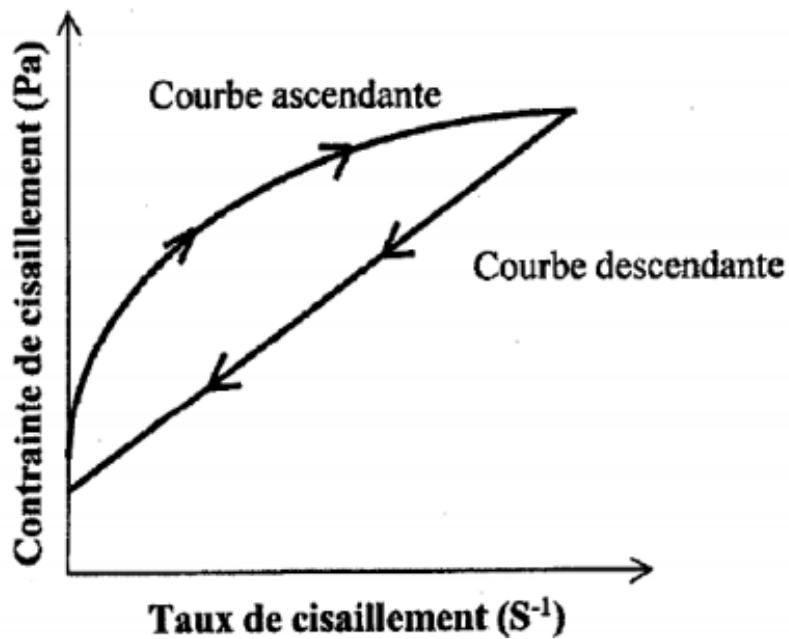


Figure.1. 6. Schéma de principe du comportement d'un fluide à seuil thixotrope [Mahaut et al. 2009].

1.4 Différents comportements rhéologiques

Dans le cas des matériaux cimentaires, plusieurs études du comportement rhéologique des aient été effectuées, il est encore difficile de donner une définition exacte des propriétés de

ces derniers à cause de la multitude des facteurs qui influencent ce comportement rhéologique [Tattersall et Bloomer, 1979]

Il existe plusieurs types de comportements rhéologiques qui se divisent en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens.

1.4.1 Fluides newtoniens

Un fluide est dit newtonien lorsque les gradients de vitesse de sa déformation en mouvement sont linéairement proportionnels aux contraintes de cisaillement appliquées d'où on peut écrire la relation qui décrit son comportement rhéologique comme suit:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1-3)$$

Avec : τ la contrainte de cisaillement [Pa] ; μ la viscosité [Pa.s] ; $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement [1/s].

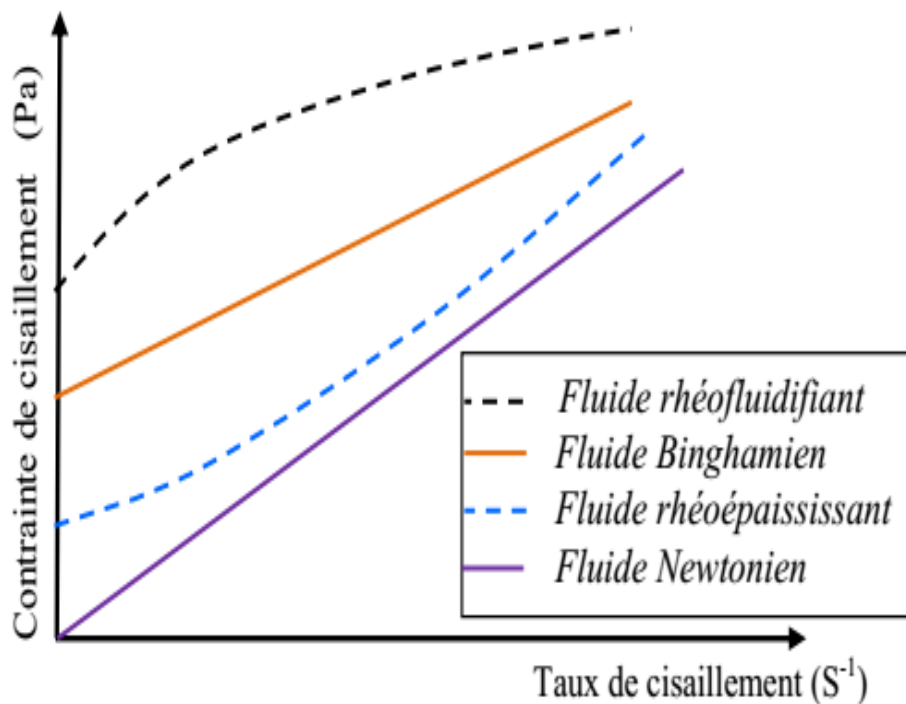


Figure.1. 7. Les comportements rhéologiques des fluides [Mahaut et al. 2009].

1.4.2 Fluides non-newtoniens

Un fluide est dit non newtonien lorsque les contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire des taux de cisaillement. Dans la famille des fluides non-newtoniens, on distingue

plusieurs comportements tels que les fluides à seuil (Binghamien), les rhéofluidifiants, les fluides rhéoépaississants, etc... [Coussot et Grossiard, 2002].

a) Fluide Binghamien

Ces types de fluides sont les plus simples des fluides anormaux caractérisés par leur comportement rhéologique particulier. Tandis qu'un fluide newtonien s'écoule sous l'action d'une force de cisaillement infiniment faible, un fluide Binghamien exige une force minimale pour provoquer son écoulement [Couarraze et Grossiord, 1983]. Pour des forces inférieures à ce seuil, le fluide se comporte comme un solide.

On appelle limite d'écoulement, ou résistance au cisaillement, ou seuil de rigidité, la tension de cisaillement à laquelle le fluide commence à s'écouler. Un fluide Binghamien se comporte ensuite comme un fluide normal. Il répond donc à l'équation ci-dessous:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1-4)$$

Avec :

τ_0 et μ représentent respectivement le seuil de cisaillement et le coefficient de viscosité. Généralement, les coulis de ciment, les mortiers et les bétons ont approximativement le comportement d'un fluide Binghamien, avec un seuil de cisaillement τ_0 et une viscosité μ [Ferraris, 1999].

b) Fluide rhéofluidifiant

Le fluide rhéofluidifiant, appelé pseudo-plastique, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. Pour ces fluides la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente. Ainsi, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement augmente.

c) Fluide rhéoépaississant

Le fluide rhéoépaississant, appelé dilatant, est représenté par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut. Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente.

1.5 Modèles rhéologiques

Plusieurs chercheurs ont ajusté les modèles rhéologiques de base pour les calibrer avec leurs fluides étudiés. Les modèles de comportement rhéologique des fluides sont consignés dans le Tableau.1. 1.

Tableau.1. 1. Modèles de comportement rhéologique des fluides

Auteur	Loi de comportement
Newton	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Herschel-berkley	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$
Ostawald	$\tau = A\dot{\gamma}^n$
Von-berg	$\tau = \tau_0 + b \sinh^{-1}(\gamma / c)$
Sisko	$\tau = a\gamma + b\gamma^c$
Robertson-sttif	$\tau = A(\gamma + B)^c$
Eyring	$\tau = a \sinh(b \dot{\gamma})$

Dans ce qui suit, on va s'intéresser aux modèles les plus connus : modèle de Newton, de Bingham et d'Herschel-Berkley.

1.5.1 Modèle de Newton

Plusieurs fluides tels que l'eau et l'huile sont classés comme des fluides Newtoniens où la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement L'écoulement d'une telle matière est décrit par l'équation suivante :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{1-5}$$

Où :

τ : contrainte de cisaillement en Pa ; η : viscosité en Pa.s ; $\dot{\gamma}$: taux de cisaillement en s⁻¹

L'équation montre que l'écoulement des fluides Newtoniens est caractérisé par un seul paramètre qui est la viscosité η .

1.5.2 Modèle de Bingham

Contrairement aux fluides Newtoniens, l'écoulement de certaines substances telles que la pâte du ciment, mortier et béton ne commence qu'après que la contrainte de cisaillement dépasse le seuil de cisaillement τ_0 , raison pour laquelle l'écoulement d'une telle matière est régi par le modèle Binghamien. Dans ce cas, deux paramètres sont nécessaires pour décrire l'écoulement, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1-6)$$

Où τ : contrainte de cisaillement en Pa

τ_0 : seuil de cisaillement en Pa; μ : viscosité en Pa.s; $\dot{\gamma}$: taux de cisaillement en s⁻¹.

1.5.3 Modèle de Herschel-Bulkley

Certains fluides non Newtonien sont caractérisés par un écoulement non linéaire. Le modèle qui prend en considération le comportement de ces fluides est celui de Herschel Bulkley comme montré dans la formule suivante :

$$\tau = \tau_0 + \kappa \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1-7)$$

Où τ : Contrainte de cisaillement en Pa; τ_0 : Seuil de cisaillement en Pa ;

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement en s⁻¹ ; κ : Consistance ; n : Indice d'écoulement.

1.6 Méthodes de caractérisation de la rhéologie

Les bétons à l'état frais sont généralement contrôlés en centrale industrielle par des essais empiriques tels que : l'essai au cône d'Abrams et le maniabilimètre. Cependant pour avoir une meilleure compréhension du comportement rhéologique du béton frais, Il convient ainsi de faire recours aux appareils de mesures plus sophistiqués (appelés rhéomètres).

Les rhéomètres sont des outils élaborés pour caractériser la rhéologie des bétons frais. Souvent inadaptés aux conditions de chantier (difficulté de transport et d'utilisation notamment), leur utilisation est destinée à une mesure en laboratoire.

Il existe une grande variété de rhéomètres à bétons. Ils peuvent être classés selon leur géométrie

- Rhéomètres agitateurs-malaxeurs (IBB, ICAR, LGCGM, Two-point test),
- Rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML, Cemagref)
- Rhéomètre plan-plan (BT Rhéom).

Brower et Ferraris [2003] ont réalisé une description et une comparaison d'une majorité des rhéomètres à bétons existants.

Le premier rhéomètre à bétons à être élaboré fut le « Two point test » en 1978 : un rhéomètre agitateur [**Tattersall et Bloomer, 1979**]. Les paramètres rhéologiques du béton sont mesurés en le considérant comme un fluide de Bingham.



Figure.1. 8. Two point test Rhéomètre [Tattersall et Bloomer, 1979].

Un nouveau type de rhéomètre (BML viscometer) est conçu en 1987 avec une géométrie créant un champ de déformation plus uniforme que celui du Two point test [**Wallevik et Gjov, 1990**].



Figure.1. 9. BML Viscometer [Wallevik et Gjov, 1990].

Le BML est un rhéomètre à cylindres coaxiaux dont le cylindre extérieur est en mouvement et le cylindre intérieur est fixe.

Un rhéomètre de type plan-plan (BTRhéom) a été développé au LCPC au début des années 1990, [Hu, 1995] (Figure.1. 10).



Figure.1. 10. BT Rhéom de type plan-plan [Hu, 1995].

La rotation du plateau supérieur crée le cisaillement, le plateau du bas étant maintenu fixe. Ce rhéomètre présente une particularité : il est le seul susceptible de mesurer la viscosité d'un béton en cours de vibrations.

Un rhéomètre à cylindres coaxiaux de grande taille (appelé Cemagref) créé à l'origine pour mesurer les paramètres rhéologiques des géomatériaux est testé avec du béton lors de la campagne de comparaison des rhéomètres de [Brower et Ferraris, 2003].

Le rhéomètre Cemagref possède ainsi un bol de grande dimension (Figure.1. 11) ce qui permet d'étudier des suspensions ayant des particules de grandes tailles (gap important, 20 cm environ entre les deux cylindres) [Coussot, 1992]. Il apparaît représentatif de la quantité de bétons fabriqué dans un malaxeur.



Figure.1. 11. Rhéomètre Cemagref [Coussot, 1992].

L'IBB a été créé en 1994 (Figure.1. 12). Il est constitué d'un outil mélangeur planétaire en forme de H. Il correspond à une version modifiée du rhéomètre « Two point test » [Beaupré, 1994].



Figure.1. 12. Rhéomètre IBB[Beaupré, 1994].

Les deux rhéomètres à bétons développés au début des années 2000 sont le rhéomètre ICAR et le rhéomètre du LGCGM (Figure.1. 13)

Ce sont deux rhéomètres de type agitateurs-malaxeurs avec une géométrie vane. Leur principale différence réside dans leur taille. Le rhéomètre ICAR possède une géométrie vane de taille plus petite (13 cm de diamètre comparée à celle du LGCGM, 15 cm) et un bol plus grand (41 cm à comparer aux 28 cm de diamètre pour le LGCGM). Le risque de localisation du cisaillement autour de l'outil et celui du glissement aux parois apparaît comme une difficulté de ce type de géométrie [Koehler et Fowler, 2004].

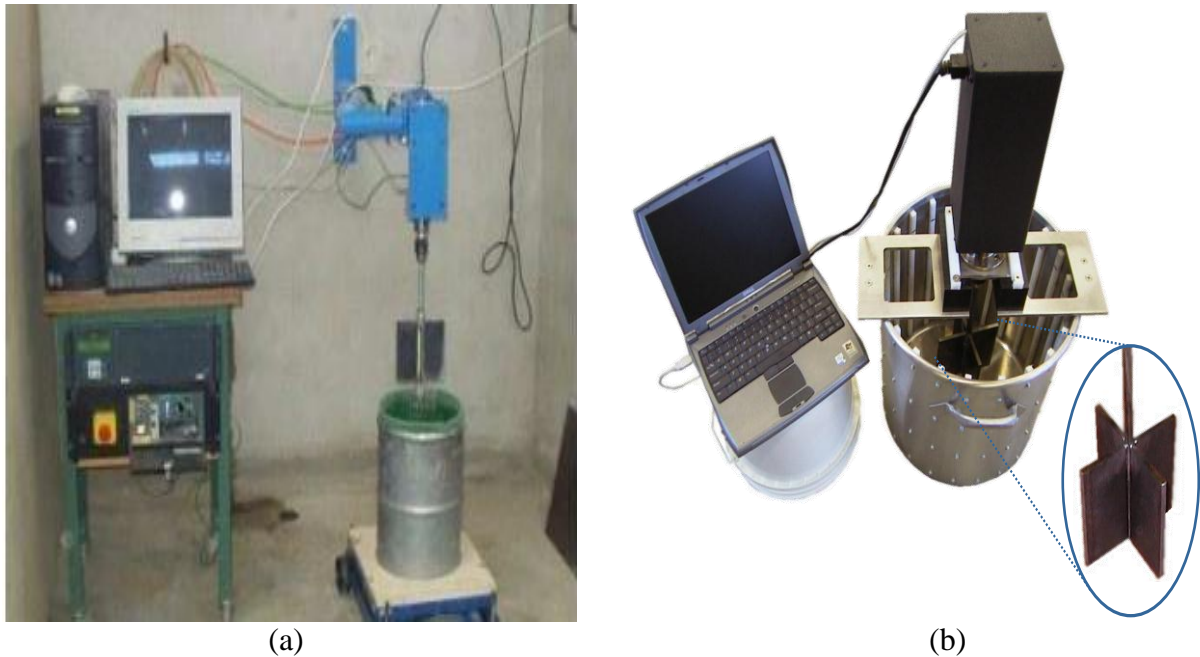


Figure.1. 13. (a) Le rhéomètre du LGCGM et, (b) le rhéomètre ICAR [Koehler et Fowler, 2004].

En fin, on peut utiliser des outils traditionnels de contrôle de la consistance du béton (tels que le cône d'Abrams, le maniabilimètre, etc.) permettent également d'estimer les propriétés à l'état frais du béton.

1.7 Facteurs affectant la rhéologie des bétons

Comme toutes les caractéristiques du béton, les paramètres rhéologiques dépendent fortement de sa composition et des propriétés physico-chimiques de ses composants [Adjoudj, 2015].

1.7.1 Effet du rapport eau-ciment

Plusieurs auteurs ont trouvés que l'augmentation du rapport E/C diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [Tattersall, 1991]. Les auteurs qui ont noté cet effet ont souvent réalisé une gâchée de béton à un faible rapport E/C et par la suite ajouté successivement des quantités d'eau. La quantité de pâte de ciment n'est donc pas constante lors que le rapport E/C varie. Effectivement, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. La Figure.1. 14. montre l'influence du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques du béton frais [Domone et al., 1999].

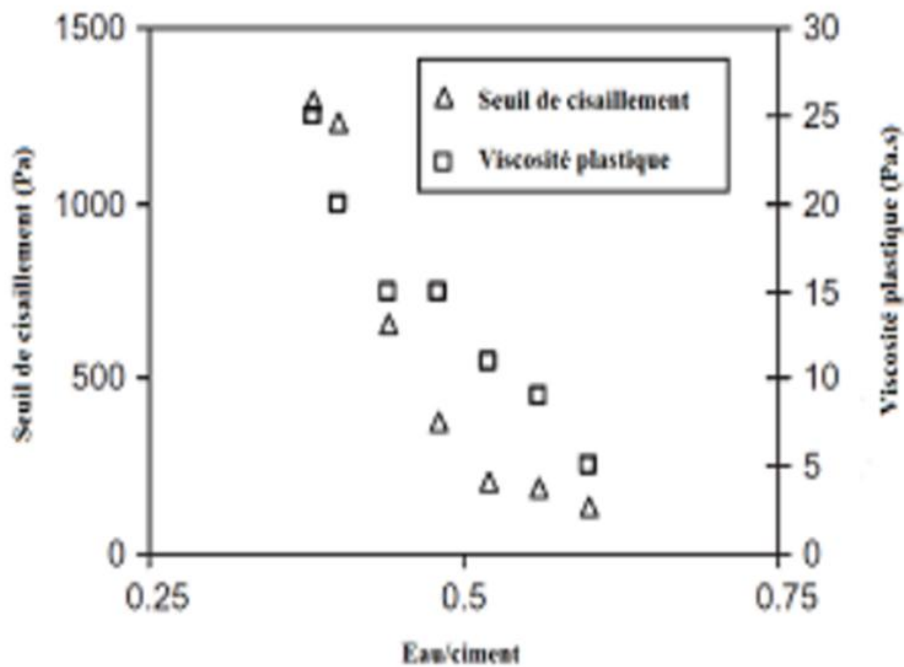


Figure.1. 14. Effet du rapport E/C sur les paramètres rhéologiques des bétons [Domone and al, 1999].

1.7.2 Effet du type de ciment

L'influence de la composition du ciment Portland sur les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires a été largement étudiée. Beaupré et Mindess [1998] ont effectué des essais avec trois types de ciment.

Quand tous les autres paramètres sont constants, un mélange fabriqué avec du ciment de type 50 (ciment résistant aux sulfates, selon la norme canadienne) montre le plus faible seuil de cisaillement; un mélange fait avec du ciment type 10 (ciment portland ordinaire, selon la norme canadienne) avec de la fumée de silice montre le plus grand seuil de cisaillement et un mélange fait avec du ciment type 10 présente un seuil de cisaillement compris entre les deux précédents. Généralement ces résultats donnent une viscosité plastique pratiquement constante. Asakura et al. [1992] ont constaté que la viscosité des pâtes de ciment augmente sensiblement dans le ciment ayant un faible rapport C_3S/C_2S ou C_3A/C_4AF lorsqu'un superplastifiant est employé.

1.7.3 Effet des adjuvants

Dans une étude menée sur le temps d'introduction des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, il a été constaté que les superplastifiants à base de naphthalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et à long termes et que la réduction de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement

dépendent de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant. Aiad [2003] a estimé un temps optimal pour l'introduction des superplastifiants entre 10 à 15 min après le début du malaxage.

Golaszewski et Szwabowski [2004] ont montré que le type de superplastifiant a une grande influence sur le comportement rhéologique des mortiers de ciment à l'état frais et que les superplastifiants à base de polycarboxylate était plus efficace que les superplastifiants à base de naphthalène. Le type de superplastifiant utilisé et sa structure moléculaire influence l'état rhéologique des pâtes de ciments. Björnström et Chandra [2003] ont mis en évidence l'action de plusieurs types de superplastifiant sur les paramètres rhéologiques où l'action des polycarboxylates est très significative comme l'illustre la Figure.1. 15.

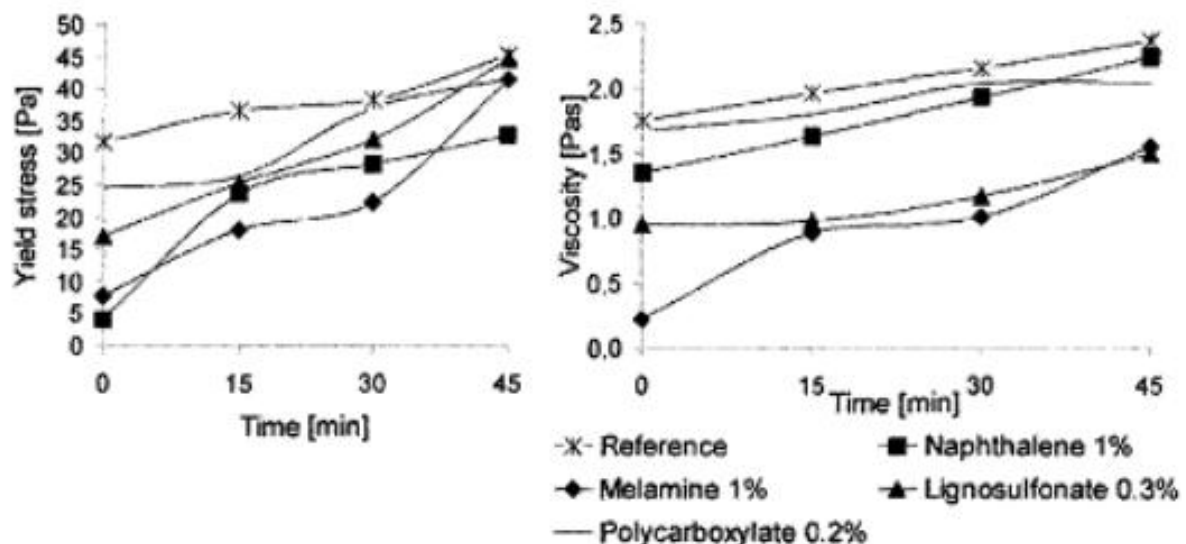


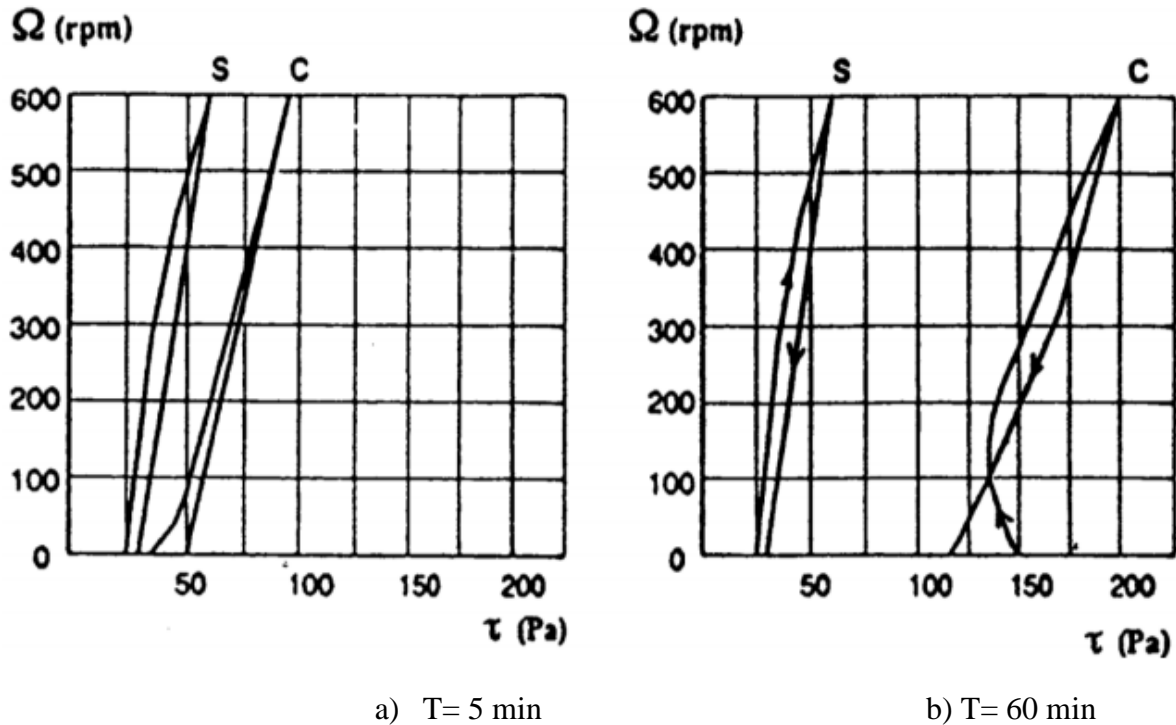
Figure.1. 15. Variation du Seuil de cisaillement et de la viscosité d'une pâte de ciment en fonction du temps, confectionnée avec différents types de superplastifiant [Björnström et Chandr., 2003].

1.7.4 Effet du temps

Le temps occupe une place particulière étant donné qu'il s'agit du seul facteur qui ne fait pas intrinsèquement partie de la composition du béton. La durée de la période où le béton frais reste suffisamment maniable est limitée dans le temps à cause du processus d'hydratation. Quand cette limite est dépassée, le béton perd sa maniabilité et son comportement rhéologique est modifié.

La Figure.1. 16 ci-dessous, montre que le seuil de cisaillement de deux pâtes différentes après des durées de 5 et 60 minutes. On constate qu'à 5 minutes ces pâtes présentent un même comportement (Binghamien). Après 60 minutes la courbe du ciment (C) se différencie

complètement de celle du quartz (S). Le seuil de cisaillement du ciment a augmenté. Il a fallu briser des liaisons chimiques pour atteindre ensuite un comportement Binghamien par contre la courbe du quartz reste identique et n'est pas affectée par le temps [Singh et Upadhyay, 1993].



Pâte E/C=0,4 S: Quartz (pâte inerte), C: Ciment (pâte active)

Figure.1. 16. Évolution du comportement rhéologique en fonction du temps.

1.7.5 Effet de la température

L'effet de la température sur la viscosité des pâtes de ciment est directement lié à leurs compositions chimiques. Les travaux de Griesser [2002] illustrés sur la Figure.1. 17 montrent que les ciments riches en C_3A se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement. En général, le seuil de cisaillement augmente avec la température, cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment riche en C_3A (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. Le coefficient de viscosité relative a tendance à diminuer avec l'élévation de température et semble relié au type de superplastifiant utilisé comme la montre la Figure.1. 18.

La viscosité augmente au cours du temps et autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30°C. Golaszewki et Szwabowski [2004] observent une forte influence de l'élévation de la température sur le comportement rhéologique des mortiers accompagné

d'une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique. Avec l'élévation de la température, la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est beaucoup plus marquée en présence d'un superplastifiant [Griesser, 2002].

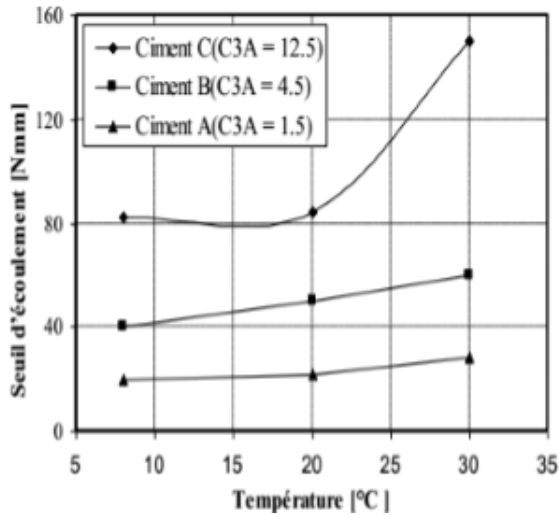


Figure.1. 17. Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température et le dosage en ciment

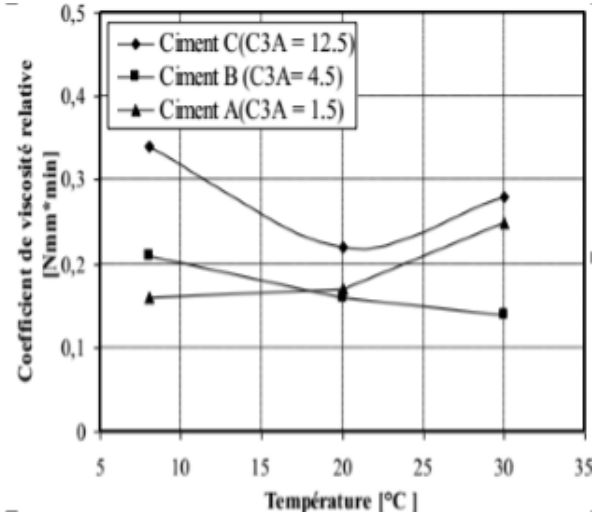


Figure.1. 18. Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en ciment

1.7.6 Influence de la poudre de marbre

La poudre de marbre c'est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Comme tous les ajouts incorporés dans les mortiers autoplaçants influent positivement sur leurs propriétés rhéologiques. Dans une étude sur l'effet de la poudre de marbre sur la viscosité des bétons de sable autoplaçants, Bouziani et al. [2011] ont trouvé que, par l'utilisation des paramètres de viscosité (indice de consistance (a) et indice d'écoulement (b), issus d'une modélisation rhéologiques), avec un dosage de 250 kg/m³ de poudre de marbre, le mélange présente des valeurs élevées de (a) et faibles de (b), ce qui signifie, selon les auteurs d'avoir un mélange initialement visqueux (résistant à la ségrégation) et fluide en écoulement.

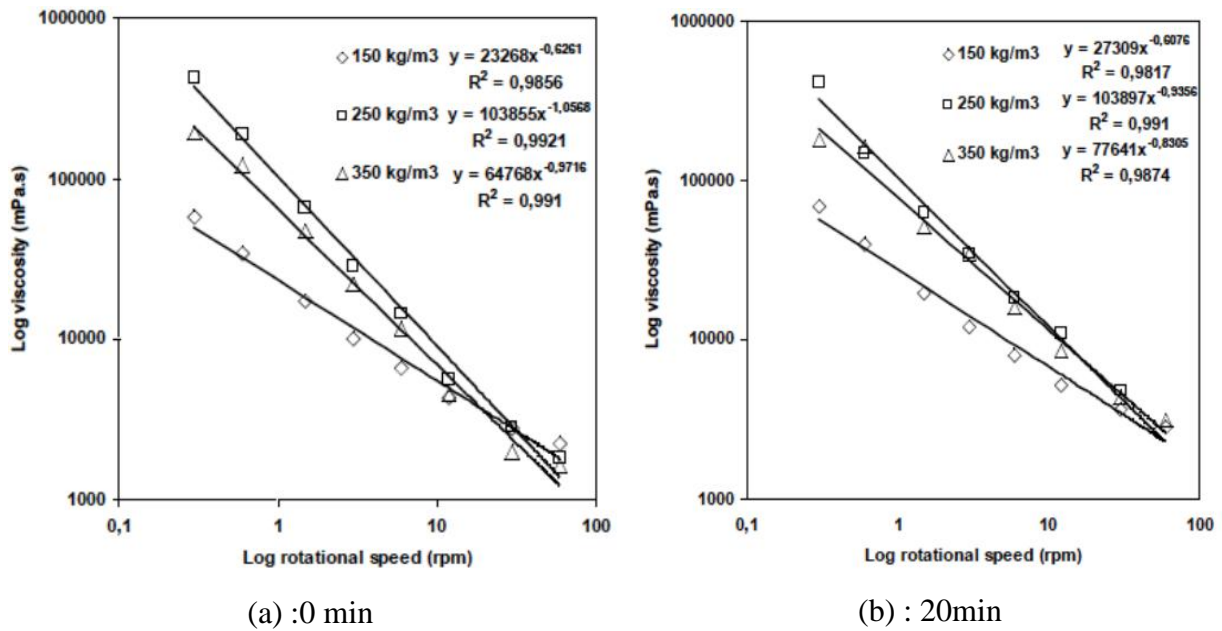


Figure.1. 19. Effet de la poudre de marbre sur la viscosité du béton de sable auto-plaçant.

Belaidi [2013] a étudié l'incorporation de la poudre de marbre dans le mortier autoplaçant. L'auteur a conclu que la substitution du ciment avec des teneurs de poudre de marbre de 5 à 30 % ont apporté un effet bénéfique sur le comportement rhéologique des mortiers autoplaçant.

Boukhalkhal [2012] a confirmé que l'incorporation de la poudre de marbre dans les BAP conduit, non seulement à une diminution de seuil de cisaillement, mais aussi de la viscosité plastique ; comme il a fait part que la substitution de 20% de poudre de marbre par rapport le ciment est la plus efficace, autant pour la résistance à la ségrégation, l'ouvrabilité, la déformabilité, la capacité de passage et la rhéologie.

Chapitre 2 : Mécanismes de ségrégation des bétons

2.1. Introduction

La ségrégation est un phénomène de séparation des constituants d'un béton ou d'un mortier frais, qui peut être provoqué par un malaxage insuffisant ou par une vibration excessive dans le cas des bétons ordinaires, et peut être par un dosage élevé du superplastifiant ou de l'addition minérale dans le cas des bétons fluides comme les bétons autoplacants (BAP).

C'est un phénomène connu, spécialement dans le cas des bétons constitués par des granulats de grosseurs différentes. Les granulats de différentes grosseurs s'y comportent différemment dans les matériaux cimentaires. La tendance à la ségrégation des grains les plus lourds étant plus grande que celle des grains légers, il faudrait de plus grandes forces de frottement pour les ralentir ou les arrêter. Or ces frottements sont au contraire plus faibles pour les gros grains que pour les petits cars à volume égal, leur surface est plus petite.

On peut donc réduire la tendance à la ségrégation, d'une part en augmentant les frottements internes et la cohésion entre la pâte et les granulats, d'autre part en évitant de le soumettre en vibration.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les mécanismes de ségrégation dans les BAP.

2.2 Description de la ségrégation du béton frais

Entre la fin du bétonnage et le début de prise se produit un phénomène de sédimentation (tassement) par gravité, les grains lourds en suspension sont attirés vers le bas. L'eau qui reflue (ressuage) entraîne à son tour une partie des grains les plus fins vers la surface de l'élément. Il en résulte, dans la zone inférieure de l'élément, une concentration plus élevée en gros grains et dans la partie supérieure, une concentration plus forte en pâte de ciment.

2.3 Les mécanismes de ségrégation

La séparation entre les gros granulats et le milieu suspendant lors de la mise en œuvre dans le coffrage, s'appelle *ségrégation dynamique*. Tandis que, la *ségrégation statique* peut apparaître une fois que le matériau est mis en place et jusqu'à la prise. La ségrégation peut être nuisible aux résistances mécaniques et à la durabilité de la structure. Or, elle n'est pas visible sur les parements sauf si elle s'accompagne de ressuage. Il est donc nécessaire de s'assurer en amont de la stabilité du béton frais, notamment celui fluide comme le BAP et de disposer d'essais de vérification avant coulage.

2.3.1 Ségrégation dynamique

La ségrégation dynamique est une séparation entre les granulats et le milieu suspendant lors de l'écoulement. Dans le cas des BAP, certaines précautions de formulation, telles que la réduction du diamètre maximal des granulats, permettent de limiter les risques de blocage aux endroits des armatures. Cette ségrégation dépend principalement de la viscosité du matériau qui permet d'entraîner correctement les granulats lors de l'écoulement.

Différents essais sont disponibles pour mettre en évidence la capacité d'un BAP à s'écouler à travers un ferrailage plus ou moins dense.

On cite par exemple l'essai à la boîte en forme de « L » (L-Box) schématisé dans la Figure.2. 1, recommandé par l'AFGC [2008]. Il permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

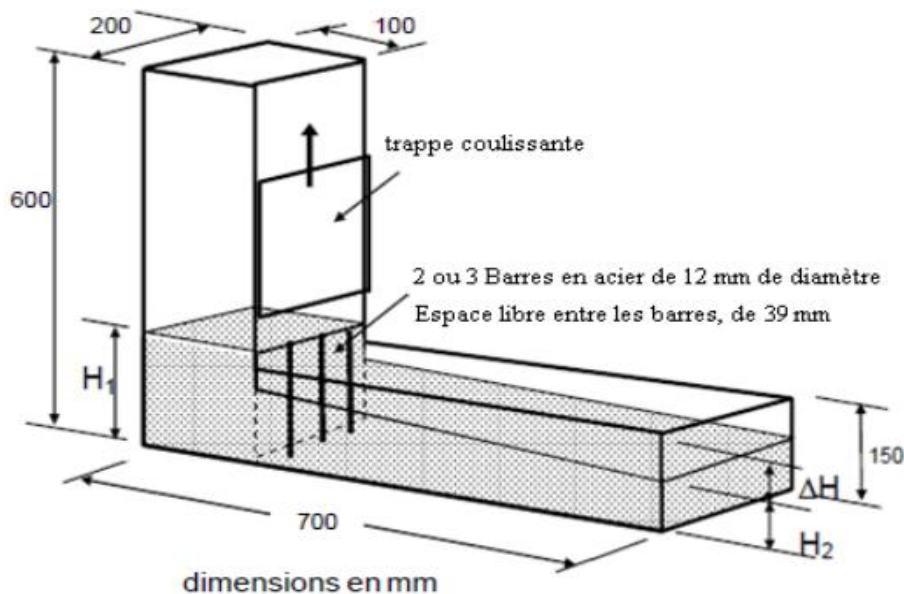


Figure.2. 1. Procédure d'essai de la Boîte en L

Il apparaît donc que le risque de blocage, pour un ferrailage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Saak et al. [2001-b] a calculé, dans le cas d'un ferrailage unidirectionnel (ferrailage vertical uniquement), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue.

L'essai L-Box consiste en une partie verticale remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 L). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont

mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport $\frac{H2}{H1}$ permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8 (limite inférieure pour avoir un BAP). Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation dynamique (Figure.2. 2).

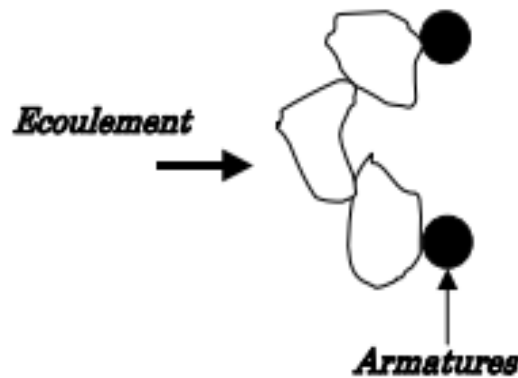


Figure.2. 2.Risque de blocage au droit des armatures.

La formule suivante donne la valeur minimale de l'espacement entre les armatures en fonction de diamètre maximal des granulats.

$$e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)d \quad (2-1)$$

Avec d : diamètre maximal des granulats

D'après ce critère, si le diamètre maximal des granulats est de 20 mm et dans le cas d'un ferrailage vertical, l'espacement doit être supérieur à 37,3 mm. On peut remarquer que cette valeur est du même ordre de grandeur que l'espacement utilisé dans le cas du L-Box. Afin de limiter le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats doit donc être réduit par rapport à celui d'un béton traditionnel. D'après l'AFGC [2008], le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Le choix d'un diamètre maximal plus important est possible mais ne se justifie que lorsque le confinement et la densité du ferrailage sont faibles.

Cependant, l'absence de ségrégation dynamique lors d'un essai L-Box ne suffit pas à garantir l'homogénéité des propriétés finales du matériau. Une instabilité du matériau peut également s'opérer lors de la phase de repos précédant la prise. C'est la ségrégation statique qui sera présentée par le point suivant.

2.3.2. Ségrégation statique

Pour l'étude du phénomène de ségrégation statique, on suppose que le matériau s'est correctement mis en place (absence de ségrégation dynamique) et que seule une ségrégation des gros granulats sous l'effet des forces de pesanteur peut apparaître. La ségrégation statique n'est pas décelable en surface (sauf si elle s'accompagne de ressuage). Il est donc nécessaire de l'appréhender en amont du coulage. Les principaux essais permettant de mettre en évidence et de mesurer la ségrégation statique sur béton frais seront présentés séparément dans le point suivant.

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du béton. Les bétons peuvent présenter de ségrégation lors et après le coulage. La séparation qui survient après le bétonnage sera plus nuisible dans les hauts éléments, elle peut conduire à des défauts de surface tels que la fissuration...etc.

Peu d'auteurs se sont intéressés aux mécanismes de ségrégation statique dans le cas des matériaux cimentaires. On peut citer les travaux de Saak et al.[2001-b]. En revanche, on trouve dans la littérature un certain nombre d'articles relatifs à la simulation numérique de chute de sphère(s) dans des fluides modèles. On peut se poser la question de l'application directe de ces études au cas des BAP. La caractérisation du comportement des matériaux cimentaires à l'état frais n'est en effet pas simple. Ceci qui est d'autant plus vrai lorsque la composition fait intervenir un superplastifiant associé à un agent viscosité. Par ailleurs, les modèles de comportement utilisables dans le cas des BAP prêtent encore à discussion. Cependant les études numériques ou expérimentales dans des fluides modèles fournissent des pistes pour la compréhension des mécanismes de ségrégation statique (Figure.2.3). Elles seront donc également présentées. Le comportement d'un granulat sera alors assimilé à celui d'une sphère.

La plupart des données les plus récentes que l'on trouve dans la littérature résultent de simulations numériques de chute de sphère(s) dans des fluides modèles de type Bingham ou Herschel-Bulkley [Beris et al, 1985], [He et al, 2001]. Quelques articles présentent des résultats expérimentaux obtenus sur des fluides modèles de type gel [Mekhatia, 2001], [Jossic, et Magnin, 2001] ou sur pâtes de ciment [Saak et al, 2001-a]. cependant, les modèles trouvés ne sont pas toujours représentatifs des matériaux cimentaires et des BAP.

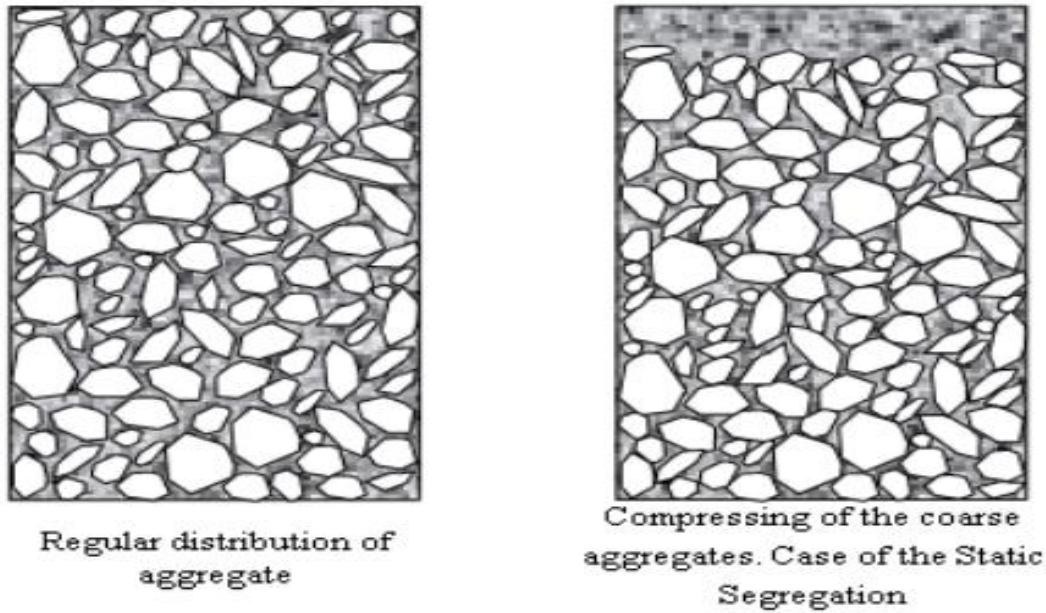


Figure.2.3.Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton.

2.4 Les essais de ségrégation statique des BAP

2.4.1 Essais de la stabilité au tamis

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité d'un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage. Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (Figure.2.4). Il s'agit de verser environ 10 kg litres du béton juste après le malaxage dans un seau, puis couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation et reposer durant 15 mn. Verser environ 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mm on mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [AFGC, 2008].

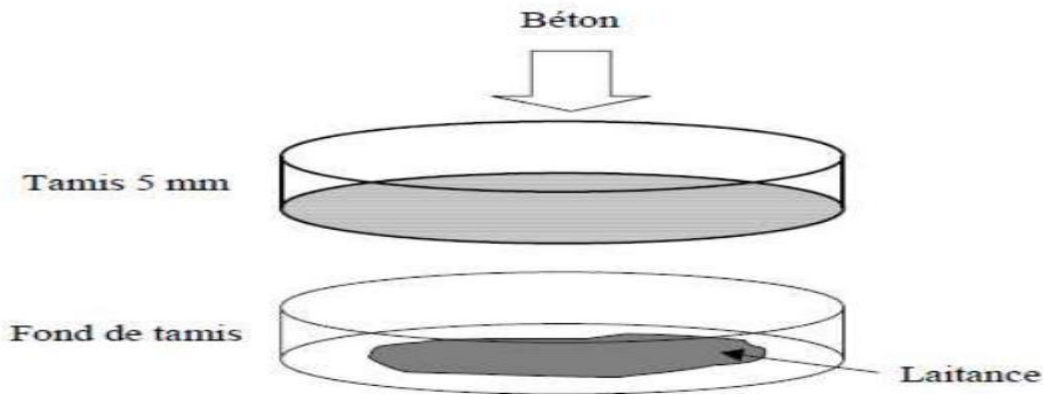


Figure.2. 4. Essai de la stabilité au tamis.

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçants de façon suivante :

$0\% \leq P \text{ laitance} \leq 15\%$ —> stabilité satisfaisante.

$15\% < P \text{ laitance} \leq 30\%$ —> stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)

$P \text{ laitance} > 30\%$ —> stabilité très mauvaise

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

2.4.2 Essais à la colonne

Cet essai, développé par Otsuki et al [1996] permet d'évaluer la résistance à la ségrégation d'un béton. Il consiste à placer le béton dans une colonne cylindrique (Figure.2. 5) ou à base carrée (10cm de côté) et à le laisser jusqu'au début de prise. Des fractions des parties supérieures et inférieures sont lavées au travers d'un tamis de 5mm et les granulats de taille supérieure à 5mm sont pesés. La ségrégation est négligeable si la distribution des granulats dans les différentes parties est uniforme. La distribution est considérée comme uniforme si la différence entre les teneurs en graviers des parties supérieure et inférieure ne dépasse pas 10% [Otsuki et al 1996] [Van et al, 1998]. D'autres auteurs considèrent une valeur de 5% pour le béton autoplaçant [Ambroise, et al, 1999].

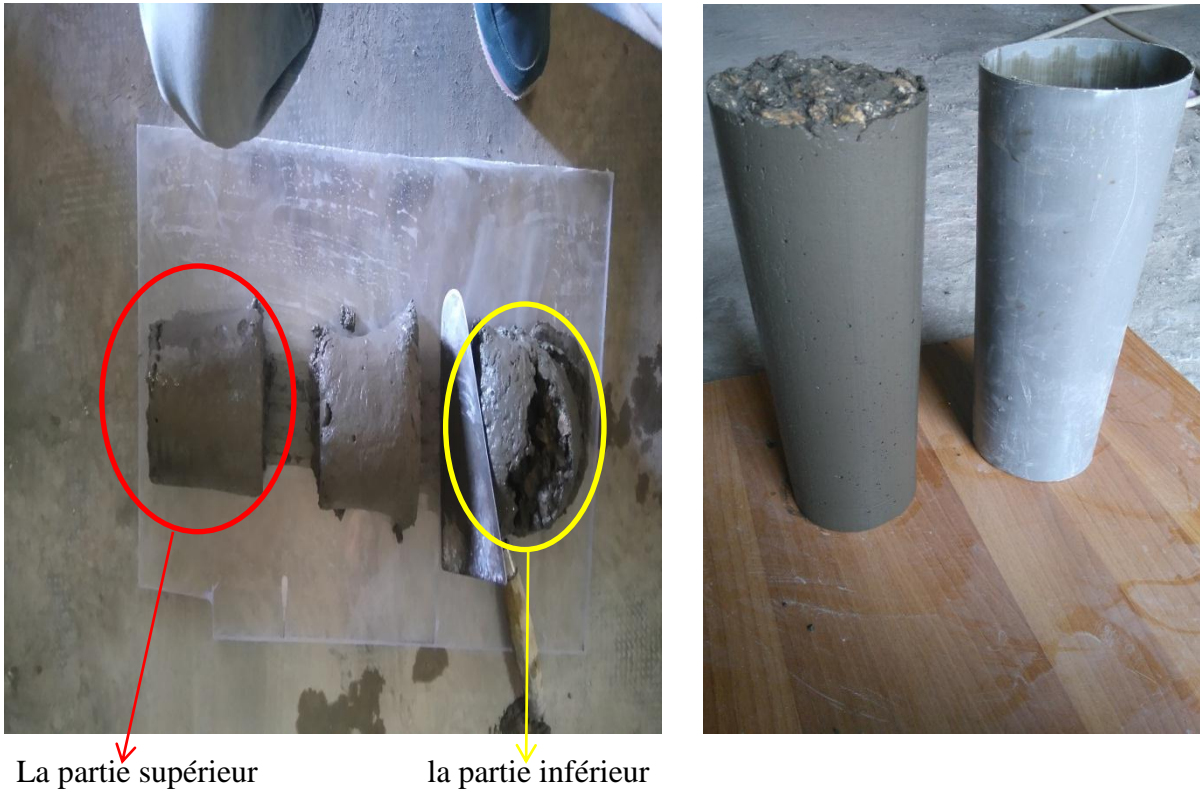


Figure.2. 5.Essais à la colonne.

L'intérêt de cet essai réside dans le fait que l'opération de séparation des différentes couches de béton se fait après la stabilisation complète du système granulaire. Ceci offre une grande facilité à l'opérateur étant donné que le béton ne risque pas de s'écouler. Les erreurs dues aux pertes de matériaux lors des opérations de séparation, de pesage sont donc relativement très minimes.

Les différentes étapes de l'essai proposé sont présentées dans ce qui suit et sont illustrées par la Figure.2. 6

- Le moule utilisé est un cylindre de dimension 110 x 400 mm
- Le béton est coulé dans le moule en une seule opération d'une hauteur de 20 cm,
- Une fois le moule rempli il est arasé à l'aide d'une règle métallique,
- Le temps d'attente est proche du temps de fin de prise,
- Le moule est séparé en trois parties plus ou moins égales (partie supérieure, partie du milieu et partie inférieure)
- Pour chaque partie, après pesage puis lavage et séchage, on détermine le rapport de la masse granulats secs (>5mm) sur la masse totale de la partie considérée,

- Les teneurs en granulats de chaque partie ($G_{supérieure}$ et $G_{inférieure}$) sont calculées : c'est le rapport de la masse des granulats secs sur la masse totale de la partie considérée.
- L'indice de ségrégation statique « ISS » est défini comme suit :

$$ISS = (G_{sup} - G_{inf}) / 100 \quad (2-2)$$

Avec :

G_{inf} : Teneur en gros granulats dans la partie inférieure.

G_{sup} : Teneur en gros granulats dans la partie supérieure.



Figure.2. 6. Les différentes étapes de l'essai de mesure de l'indice de ségrégation statique.

2.4.3 Essai au cylindre

L'essai de ségrégation au cylindre a été proposé par Van Bui et al. [1998]. Il s'agit d'un appareillage assez simple, donc utilisable éventuellement sur chantier (Figure.2. 7).

L'essai consiste à placer un cylindre (en aluminium ou en plastique) sur la surface de l'échantillon de béton à tester et à le laisser pénétrer dans le matériau. Au bout de 45 mm à la hauteur de pénétration (Pd) est mesurée. Cette manipulation est répétée sur deux côtés diamétralement opposés de l'échantillon.

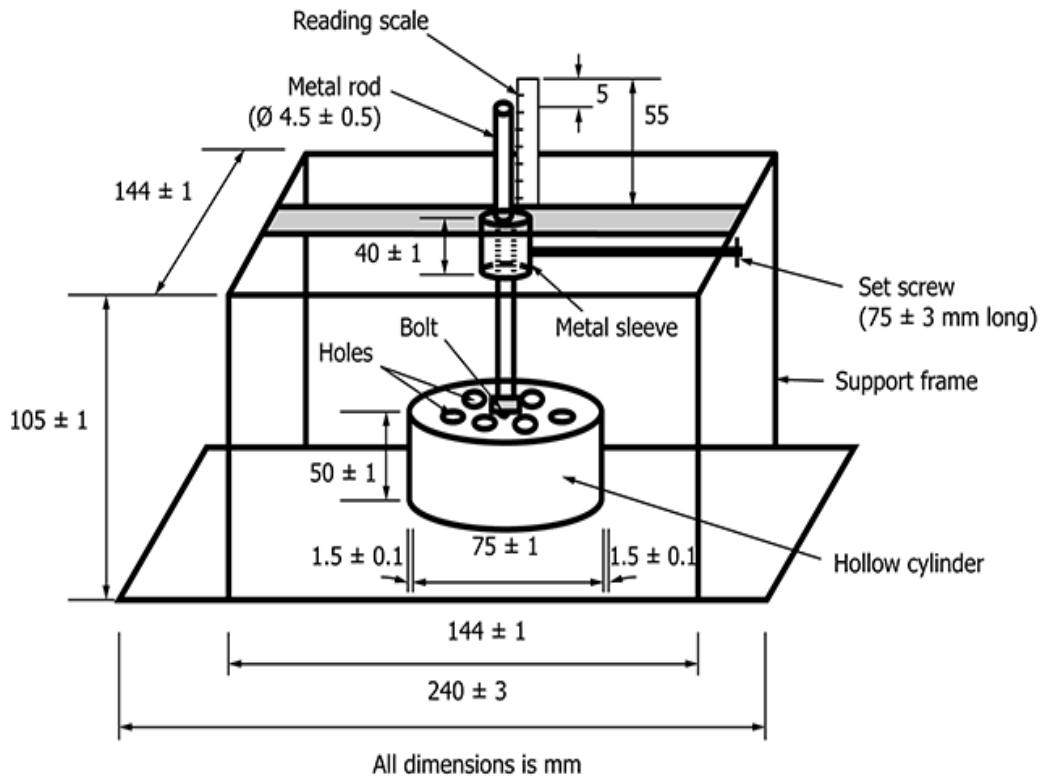


Figure.2. 7.Essai de stabilité au cylindre.

Le critère de stabilité associé à cet essai est le suivant :

- si $Pd \leq 8$ mm, alors le béton présente une bonne résistance à la ségrégation.
- si $Pd > 8$ mm, le béton offre une faible résistance à la ségrégation.

Cet essai présent l'avantage d'être très simple à réaliser et les résultats sont obtenus directement. De plus, l'appareillage est peu cher et peu encombrant. Mais la surface d'essai doit être parfaitement plane. Par ailleurs, il n'y pas données prouvant le caractère répétable et reproductible de cet essai, ni de données concernant la précision de cet essai Sedran [1999] soulevait la question de la représentativité du cylindre utilisé car il ne disposait pas de ses caractéristiques. Une publication récente de Van Bui et al.[2002] indique que le cylindre pèse 54 g. En prenant une masse volumique de 2700 kg/m³, on peut alors calculer le diamètre du granulats que représente le cylindre. On obtient : $D \approx 15,7$ mm. Cependant, on peut mettre en

doute la représentativité de la forme du cylindre utilisé et de son état de surface vis-à-vis d'un granulats réel.

2.5 La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [**Legrand, 1982**], [**RILEM, 2001**]. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. L'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité indépendamment des solides dans le mélange. Ceci à l'extrême se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton. Des matériaux de surface granulaire plus élevée, peuvent par absorption et adsorption retenir une quantité supplémentaire d'eau libre. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité. Les autres aspects de ségrégation sont évités en utilisant une pâte capable de maintenir les particules solides et l'air distribués uniformément en suspension. Ceci nécessite une forte interaction entre les phases du béton, qui correspond à des forces résultantes des frictions entre les particules. Or, on ne peut pas augmenter les interactions entre les particules du béton puisque l'écoulement du béton sera fortement influencé, et les risques de blocages de gravier seront importants pendant un passage dans un milieu confiné ou encombré par les armatures. On a donc intérêt à augmenter la cohésion entre les phases, plutôt que les interactions [**RILEM, 2001**]. Ceci est possible avec une pâte de rapport E/C réduit, ou l'utilisation d'un agent de viscosité.

2.6 Paramètres influant sur la ségrégation

2.6.1 Influence des additions minérales

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les bétons autoplaçants contiennent une quantité de fines, notée A, de l'ordre de 500 kg/m³ (selon les recommandations de l'AFGC). 110 Pour tenir compte, vis-à-vis de la durabilité, des additions associées à des CEM I, la norme EN 206-1 introduit la notion de « Liant équivalent $L=C + k F$ ».

Le coefficient k varie en fonction de la nature de l'addition : Pour le Filler calcaire, $k = 0.25$

C : dosage ciment ; k : coefficient ; F: Addition.

2.6.2 Influence du rapport gravillon/sable (G/S)

Généralement, la tendance à la ségrégation est plus prononcée dans le cas des bétons contenant des gros granulats au détriment des granulats fin. Donc, l'optimisation du rapport S/G à une importance primordiale pour éviter le phénomène de ségrégation. L'approche classique adoptée en France est la méthode de Baron -Lesage tirée de l'expérimentation et développée au LCPC dans les années 1980. Cette méthode pratique est basée sur des essais au maniabilimètre LCPC et permet avec cet outil de déterminer la maniabilité maximale du béton en fonction du rapport S/G. Elle a l'avantage de mener à des bétons qui présentent des risques de ségrégation minimaux [Rossi, 1998].

Toute fois les gravillons augmentent la compacité granulaire du squelette ce qui permet de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir les caractéristiques rhéologiques et mécaniques souhaitées [Larrad et Roy,1992].

2.6.3 Influence du diamètre maximal

D'un point de vue rhéologique, les gravillons de diamètre maximal (compris entre 10 et 20mm) sont à l'origine des blocages et le risque de ségrégation augmentent lorsque le diamètre maximal des granulats augmente [Da Cruz, 2004].

Il apparait que le risque de blocage, pour un ferrailage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Fujiwara [1992] a calculé, dans le cas d'un ferrailage unidirectionnel (ferrailage vertical uniquement) et dans le cas d'un ferrailage bidirectionnel (ferrailage verticale et horizontal), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue. Ils obtiennent le critère présenté dans l'équation suivant :

$$\text{Cas1 - D : } e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot d \quad (2-3)$$

$$\text{Cas2 - D : } e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cdot d \quad (2-4)$$

Avec d : diamètre maximal des granulats.

D'après ce critère, si le diamètre maximal des granulats est de 20 mm et dans le cas d'un ferrailage vertical (cas1-D), l'espacement doit être supérieur à 37.3 mm. On peut remarquer

que cette valeur est du même ordre de grandeur que l'espacement utilisé dans le cas de L-box par exemple.

Afin de limiter le risque de blocage, le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Le choix d'un diamètre maximal plus important est possible mais ne se justifie que lorsque le confinement et la densité du ferrailage sont faibles.

2.6.4 Influence de l'adjuvant

Les "superplastifiants" ou plastifiants "réducteurs d'eau" fournissent une grande fluidité et un long maintien de la rhéologie sans ajout excessif d'eau. Le superplastifiant est de ce fait un élément essentiel du béton auto-plaçant. Le dosage en superplastifiant est tout de même limité afin d'assurer une résistance minimale de 4 MPa à 16 heures pour la capacité portante de la structure. De plus, un dosage proche ou supérieur au dosage de saturation peut augmenter la sensibilité du béton à une légère variation du dosage en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage [AFGC, 2008].

2.6.5 Influence de la pâte de ciment

La densité d'une pâte de ciment sera toujours plus faible que celle des granulats, ce qui d'après le principe d'Archimède ne peut assurer l'équilibre des plus gros granulats dans une suspension de ciment si les dissipations visqueuses de la matrice ne sont pas suffisantes pour ralentir leur chute. Umehara *et al* [1994] montrent en effet qu'une diminution progressive de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation.

2.6.6 Influence du rapport eau sur ciment (E/C)

L'eau est une composante essentielle du béton, c'est le plus important avec le ciment. Elle remplit deux fonctions principales :

- L'une physique qui confère au béton ses propriétés rhéologiques ;
- Et l'autre chimique qui contribue au développement des réactions dites d'hydratation.

Selon [Powers, 1935], il faut 0,23 g d'eau pour hydrater complètement 1 g de ciment. De multiples recherches ont montré l'effet bénéfique d'une diminution du rapport E/C sur le développement des résistances mécaniques du béton.

Dans le cas de l'augmentation du rapport E/C , en même temps, la viscosité et le seuil de cisaillement diminuent, alors le risque de la ségrégation augmente.

Le rapport E/C exerce une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Plus le rapport E/C est faible, plus, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces à remplir entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates.

Les bétons autoplaçants sont des bétons très sensibles aux variations du rapport E/C, Abdelouahed et al [2011] et Bouhamou et al [2008] ont trouvé qu'il y a une relation proportionnelle entre le rapport E/C et l'étalement, le rapport E/C implique une augmentation dans l'étalement, ainsi ils ont conclu que le dosage en eau reste une grandeur nécessaire pour normaliser la fluidité d'un BAP.

El Chabib et al. [2006] ont montré que la diminution du rapport E/C réduit de manière significative la ségrégation dynamique, ceci est attribué à l'augmentation à la fois de la limite d'élasticité et de la viscosité plastique du béton. En outre, la diminution supplémentaire du rapport E/C n'influence pas la stabilité dynamique, mais augmente considérablement la viscosité. De leur côté Utsi et al. [2003] ont montré que l'augmentation du dosage en eau ou du rapport E/C réduit les paramètres rhéologiques tels que le seuil de cisaillement et la viscosité.

Chapitre 3 : Matériaux et méthodes

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode de plan d'expérience utilisée pour la réalisation et l'optimisation des différentes compositions étudiées. Enfin, nous avons caractérisé les différents matériaux (sable, ciment, granulats, addition minérale) utilisés dans l'étude expérimentale et les procédures d'essais réalisés au niveau du laboratoire de génie civil (pédagogique) et Laboratoire de Recherche de Génie Civil (LRGC) de L'Université Ammar Telidji de Laghouat.

3.2 Méthode de plan d'expériences

3.2.1 Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles, notamment celles expérimentales. 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 :

$$y = f(x_i) \quad (3-1)$$

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

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.

3.2.2 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure.3. 1). La valeur donnée à un facteur pour

réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure qui s'appelle aussi le niveau bas et la borne supérieure qui s'appelle aussi le niveau haut.

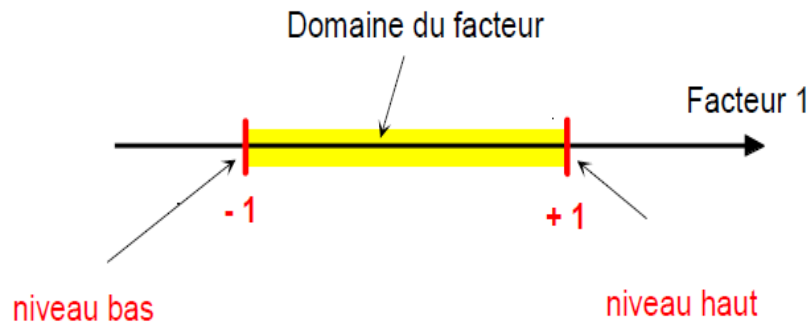


Figure.3. 1. Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par $+1$. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le *domaine* du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé *l'espace expérimental* (Figure.3. 2).

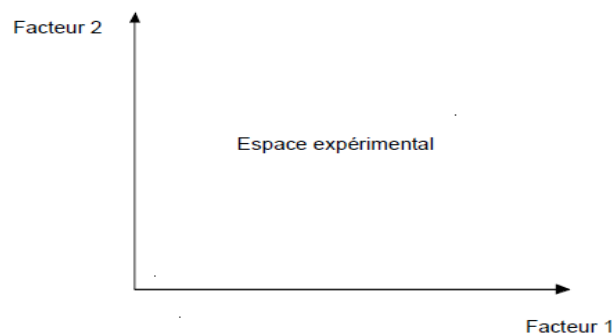


Figure.3. 2. Espace expérimental pour deux facteurs.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure.3. 3). Une expérience donnée est

alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

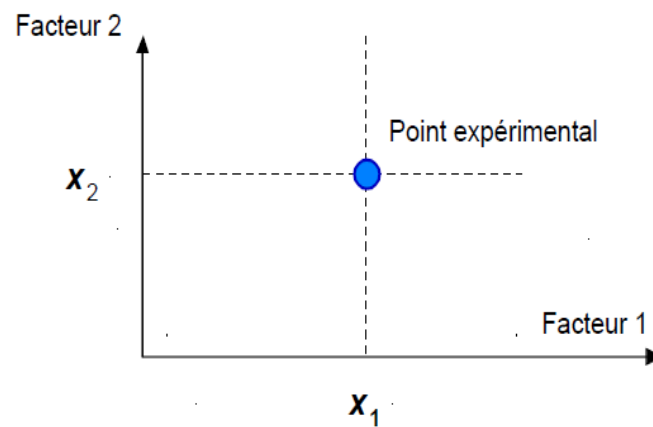


Figure.3.3. Représentation d'une réponse dans un espace expérimental.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure.3.4).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

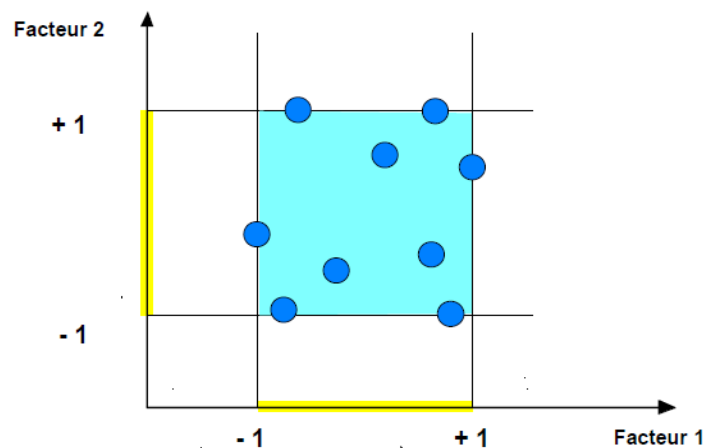


Figure.3.4. Domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais, il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple l'ensemble des couleurs : blanc, rouge, vert, jaune, etc. On grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace

expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

3.2.3 Plan pour surface de réponse (plan composite)

Dans un plan d'expérience, une expérience est représentée par un point avec coordonnées

(x_{1i}, x_{2j}) . L'ensemble de tous les points expérimentaux constituent un ensemble de réponses, qui constituent à leurs tours une surface de réponse (Figure.3. 5).

Dans un plan classique (factoriel) basé sur des facteurs à deux niveaux, on peut obtenir des modèles mathématiques du premier degré. Dans la plus part des cas des matériaux de génie civil, on rencontre souvent des comportements avec un maximums ou un minimum. Ces comportements nécessitent des modèles de second degré [Khayat, 2000; Sonebi, 2001; Yahia, 2001; Bouziani, 2012]. A cet effet, on fait recours aux plans pour surfaces de réponse, dont le plus connu est le plan composite.

peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les

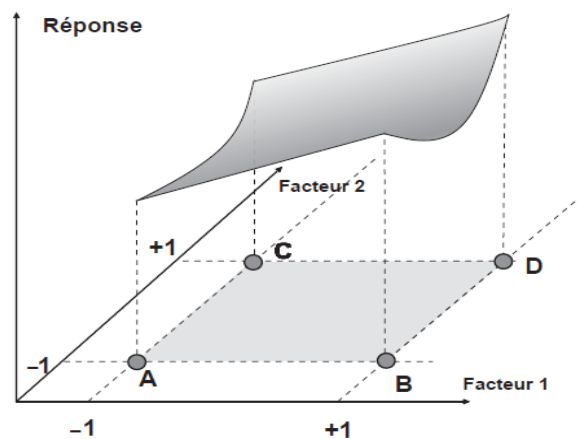


Figure.3. 5. Surface de réponse formée par les points expérimentaux.

Le plan composite peut être un plan factoriel complet augmenté par des points axiaux. La flexibilité de ce type de plan réside dans le fait qu'il permet de passer par une analyse d'un modèle d'ordre 1 avant de passer à l'augmentation du plan par des points axiaux et l'analyse d'un modèle d'ordre 2. Le test de passage est effectué par l'intermédiaire des points centraux ; si le test est satisfaisant (c'est-à-dire, si la réponse mesurée au centre du domaine est proche à la réponse calculée au même point), l'étude se termine et nous ne passons pas à l'augmentation de plan. Les points supplémentaires sont représentés par des points

d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile (Figure.3. 6).

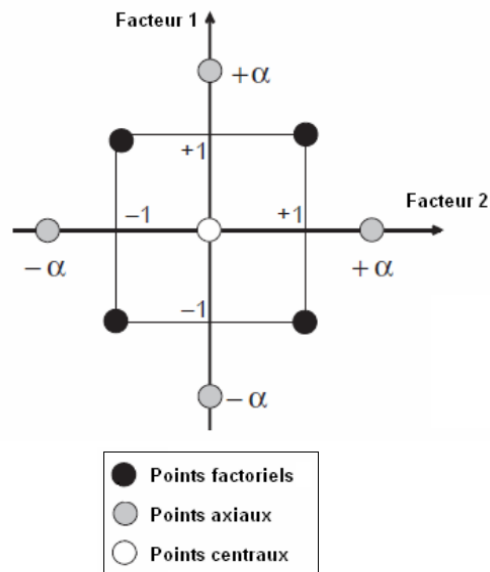


Figure.3. 6. Exemple d'une représentation schématique d'un plan composite avec deux facteurs.

Le nombre total (n) d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (n_f), des essais du plan en étoile (n_α) et des essais au centre (n_0) :

$$n = n_f + n_\alpha + n_0 \quad (3-2)$$

3.2.3.1 Eléments de base appliqués aux plans d'expériences

Dans ce qui suit, on donne des explications et des définitions aux principaux outils mathématiques appliqués aux plans d'expérience, qui permettent de bien expliquer et comprendre les résultats trouvés.

a) Erreur expérimentale

L'erreur expérimentale est estimée en utilisant les valeurs des essais centraux:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n) \quad (3-3)$$

Le carré des écarts des valeurs centrales à la moyenne peuvent être calculés comme suit :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3-4)$$

La somme des carrés des écarts est prise comme mesure de dispersion des valeurs centrales autour de la moyenne.

On peut calculer **la variance (V)**, en divisant la somme des carrés des écarts par le nombre des points centraux moins 1 (le nombre de points moins 1 est appelé **degré de liberté**).

Enfin, **l'écart-type (σ)** peut être calculé en prenant la racine carrée de la variance :

$$\sigma = \sqrt{V} \tag{3-5}$$

Le nombre des réponses qui interviennent dans la mesure de l'écart-type influe sur sa qualité. Plus le nombre est grand plus la qualité est bonne.

b) Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance Ic est lié à :

- La probabilité retenue par l'expérimentateur (généralement en prend des probabilités > à 95%).
- La qualité de l'écart-type calculé.

On a :

$$Ic = k. \sigma \tag{3-6}$$

Où: k est un coefficient lié à la qualité de l'écart-type. Le Tableau.3. 1 indique les valeurs de k en fonction de la probabilité choisie et le nombre de mesures qui interviennent dans le calcul de l'écart-type..

Tableau.3. 1. Valeurs de k (Goupy, 2006).

		Nombre de mesures ayant servi à calculer l'écart-type.						
		2	3	4	5	10	20	∞
Probabilité retenue	70%	1.96	1.38	1.25	1.19	1.10	1.06	1.03
	90%	6.31	2.92	2.35	2.13	1.83	1.73	1.64
	95%	12.71	4.3	3.18	2.78	2.26	2.06	1.96
	99%	63.66	9.92	5.84	4.6	3.25	2.86	2.58

c) Influence des facteurs

L'influence des facteurs est jugée par leurs coefficients trouvés. On fait intervenir aussi l'écart-type pour l'évaluation de l'importance d'un coefficient (a_i), Cette évaluation est effectuée par le rapport entre le coefficient est son écart-type:

- Si le coefficient est nettement plus grand que son écart-type, on dit que l'effet de coefficient est important.

- Si le coefficient est nettement plus petit que son écart-type, on dit que l'effet de coefficient est négligeable.
- Si le coefficient est comparable à son écart-type, son effet est laissé à l'expérimentateur.

Ce rapport est appelé **rapport-t** ou **t-student**. Ce rapport permet de calculer la probabilité que l'effet de coefficient soit important ou négligeable. Cette probabilité est appelée aussi **p-value**.

L'écart-type, comme mentionné avant, peut être divisé en deux parties : erreur expérimentale (ε) et manque d'ajustement (Δ).

d) Analyse de la variance

Cette analyse a pour but de localiser les sources de variation des réponses. En utilisant la méthode des moindres carrés. Dans ce cas, la différence trouvée s'appelle *résidus* (r_i). On peut écrire :

$$y_i = \hat{y}_i + r_i \quad (3-7)$$

L'analyse de la variance fait intervenir la différence entre les réponses et leur moyenne, qui représentent les écarts des réponses à la moyenne et qui s'écrit :

$$\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 + \sum r_i^2 \quad (3-8)$$

La somme des carrés des résidus est donc la plus faible valeur de la somme des carrés des écarts. Si on divise la somme des carrés des résidus par le nombre de degré de liberté associé, on obtient la variance des résidus $V(r_i)$:

$$V(r_i) = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3-9)$$

C'est sur la base de cette valeur qu'on peut évaluer l'importance d'un coefficient dans le modèle postulé.

La représentation de l'analyse de la variance est généralement effectuée sous la forme de tableau. La plus simple forme de ce tableau comporte 05 colonnes (source de variation, somme des carrés, degrés de liberté, carré moyen et statistique de Fisher) et 4 lignes (titres, modèle corrigé de la moyenne, résidus et réponses mesurées corrigées de la moyenne).

Le rapport F (de Fisher), qui est le rapport entre le carré moyen du modèle et les résidus. Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux.

e) Coefficient de détermination

L'analyse de la variance permet aussi de calculer le coefficient de détermination R^2 . C'est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées à la somme des carrés des réponses mesurées :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées}} \quad (3-10)$$

Ce rapport permet d'estimer la qualité du modèle postulé. Tant qu'il est proche de 1 c'est mieux.

3.2.4 Modélisation mathématique

La réponse peut être représentée, a priori, par une forme générale comme le suivant :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3-11)$$

Pour en faire une approximation, on prend un développement Taylor-Mac Laurin, comme une première proposition. Donc, on peut réécrire la forme générale dans l'équation comme suit :

$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots$	(3-12)
--	--------

Où :

y est la réponse ; x_i représentent les facteurs ; a_0, a_i, a_{ij}, \dots , sont les coefficients du polynôme.

Il faut noter que les modèles issus de la modélisation sont valables dans le domaine d'étude, délimité au démarrage. La modélisation proposée est une modélisation expérimentale, c'est pour cela qu'on apporte deux compléments au modèle:

- 1- Le manque d'ajustement (Δ): représente la différence entre le modèle proposé est celui réel, trouvé après la modélisation.
- 2- L'erreur expérimentale (ϵ) : représente la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse.

L'équation du modèle proposé doit être modifiée comme suit :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots + \Delta + \varepsilon \quad (3-13)$$

Pour la résolution de cette équation, on utilise une méthode de régression, généralement basée sur le critère d'optimisation des moindres carrés.

3.3 Essais de caractérisation des matériaux utilisés

Dans notre travail, nous avons utilisé le ciment CEMI-42.5 CRS (SPA BISKRIA CIMENT), pour produire nos compositions de BAP.

Avant de présenter les résultats des essais de caractérisation des matériaux, on présente tout d'abord les méthodes d'essais utilisées.

3.3.1 Méthodes et procédures d'essais

Plusieurs essais ont été réalisés sur les matériaux (ciment, sable, granulat et fine).

Les principaux essais sont:

Masse volumique spécifique, surface spécifique Blaine, analyse granulométrique du sable et gravir3/8et 8/15, coefficient d'absorption du sable et granulat, Analyse par rayons X, analyse chimique et minéralogique du ciment.

3.3.1.1 Masse volumique spécifique

Nous avons effectué la méthode du pycnomètre de Le Chatelier pour la mesure des masses volumiques des poudres (ciment). Les équipements nécessaires à la réalisation sont:

- Un pycnomètre d'une contenance minimale 25 cm³
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le clinker, par exemple le benzène.
- Une balance d'une précision adaptée à la grandeur de masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre précis à 0.1 permettant de connaître la température du laboratoire.



Figure.3. 7. Equipement nécessaire de l'essai.

Quant au cas du sable, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée. La masse volumique absolue est la masse par unité de volume d'un matériau (tout vide déduit) est donnée selon la norme **NFP 18-555** par la relation suivante :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (3-14)$$

M : Masse des granulats (kg) ; **V1** : Volume d'eau (m³) ; **V2** : Volume totale (eau + granulats) (m³) ;

3.3.1.2 Surface spécifique Blaine (SSB)

Il s'agit de la surface spécifique mesurée par la méthode de Blaine, appelée finesse [**Blaine, 1943**] (Figure.3. 8). Cette technique exploite la perméabilité d'un lit d'une poudre compacté dans une cellule de mesure (la technique de mesure repose sur deux principe: une porosité constante ou une masse constante)



Figure.3. 8. Equipement nécessaire de l'essai perméabilité Blaine.

Le schéma d'un perméabilimètre Blaine est donné par la Figure.3. 9. Les mesures effectuées pour l'étude ont utilisé une porosité du lit de poudre $e=0,58$. La masse de poudre ajoutée pour les essais est calculée grâce à la relation au-dessus en fonction des paramètres géométriques de la cellule de mesure.

Le temps nécessaire à un volume d'air pour passer à travers la couche de poudre est fonction de la surface développée par celle-ci. La surface peut être déterminée grâce à la relation de dessous.

$$S_p = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}} \quad (3-15)$$

K : La constante de l'appareil. **η** : La viscosité de l'air à la température de l'essai.

t: Temps mesuré en seconde. **e**: La porosité. **ρ** : Masse volumique absolue.

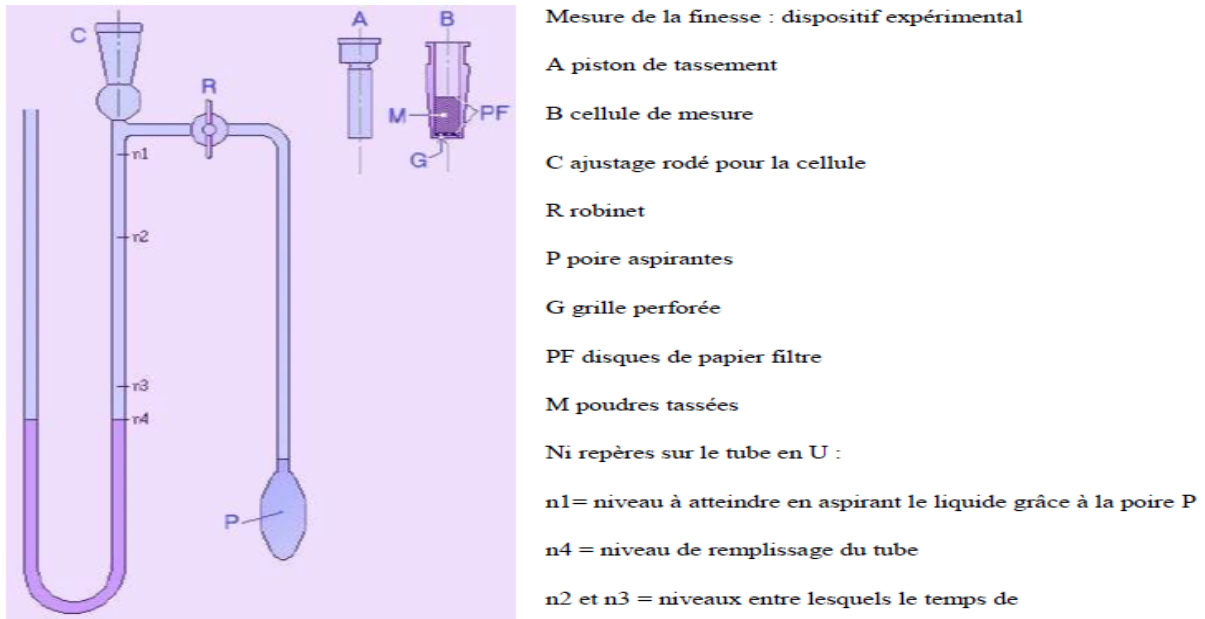


Figure.3. 9. Schéma d'un perméabilimètre de Blaine à mesure manuelle.

La constante d'appareil, K, est mesurée grâce à l'étalonnage de l'appareil, utilisant un échantillon de poudre de finesse connue (étalon).

3.3.1.3 Essai d'équivalent de sable

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculant, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H1) et du sédiment + flocculant (H2), selon la norme **NF P 18-598** (Figure.3. 10). L'équivalent de sable est donné par les relations ci-dessous.

$$ESv = \frac{h/2}{h1} * 100\% \quad (3-16)$$

$$ESv = \frac{h2}{h1} * 100\% \quad (3-17)$$

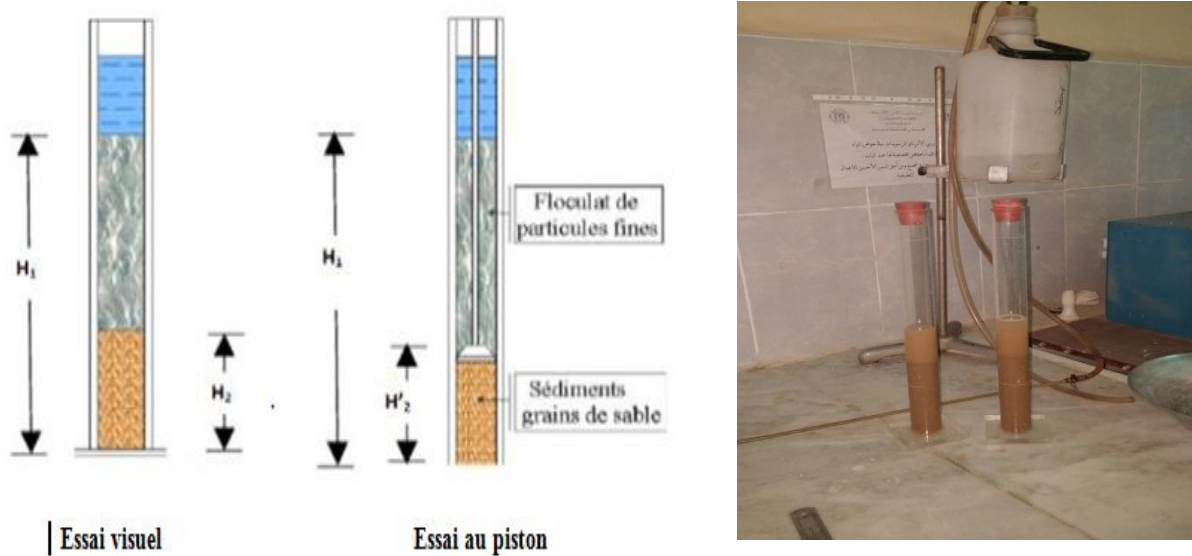


Figure.3. 10. Essai d'équivalence de sable.

3.3.1.4 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre (Figure.3. 11). Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme **NF EN 933-1**. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 80 micromètres (0.08mm).

Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures). Le tamisât ou passant désigne la partie qui traverse le tamis.

Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon de granulat. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités soit numériquement soit graphiquement. Cela permet d'observer la proportion de refus cumulé ou de tamisât jusqu'à un diamètre de grain par rapport au granulat. (La représentation graphique est plus explicite).

A partir de l'analyse granulométrique on peut déduire le module de finesse de sable qui définit comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

0/5 : 5; 2.5; 1.25 ; 0.63 ;0.315 ; 0.160 ; 0.08

en plus on a fait l'analyse granulométrique du granulats (gravir 3/8 et 8/15) pour défini le pourcentage des particule fin dans le gravir le classement de la série de tamis est :

3/8 : 5.0 ; 2.5 ; 1.25 ; 0.63 ; 0.315 ; 0.16 ; 0.08.

8/15 : 25 ; 20 ; 16 ; 12.5 ; 10 ; 8 ; 6.3.

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus sur les tamis}\%}{100} \quad (3-18)$$



Figure.3. 11. Série de tamis de l'analyse granulométrique.

3.3.1.5 Mesure du coefficient d'absorption de sable (NF P 18-555)

a) But de la mesure

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulats provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

b) Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 C°. Le coefficient d'absorption est défini par la relation.

$$A_b(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (3-19)$$

M_s masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 C°

M_a masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit

c) Conduite de l'essai

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire. on peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (Figure.3. 12).

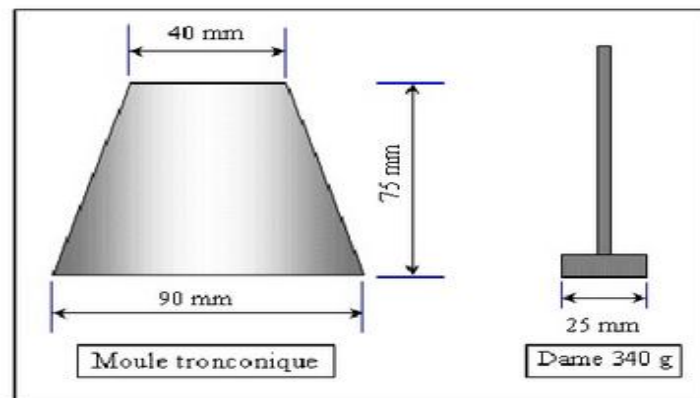


Figure.3. 12. Moule et dame pour coefficient d'absorption.

La Capacité d'absorption d'eau de sable utilisé est égale à : **1.39%**.

3.3.1.6 Détermination des paramètres rhéologiques

La rhéologie du béton est l'étude de l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet de contraintes. Cette science s'applique autant aux corps solides qu'aux corps liquides. Le béton est un matériau qui présente ces deux caractéristiques. Son écoulement résulte de l'interaction de la phase visqueuse (pâte de ciment) et une phase solide (granulats). Pour mettre en mouvement le béton, une contrainte minimale est nécessaire. Elle est appelé seuil de cisaillement (τ_0). Une fois que cette dernière est dépassée et que le béton est mis en mouvement, la contrainte de cisaillement (τ) qui est liée au gradient de vitesse (γ). La

constante de proportionnalité est la viscosité plastique (μ). Ainsi le seuil de cisaillement et la viscosité plastique décrivent le comportement rhéologique du béton.

a) Matériels nécessaires

- Balance,
- Malaxeur à béton,
- Rhéomètre,
- Matériel de manutention et de nettoyage (brouette, bacs, pelles, truelles, brosses, chiffons..),

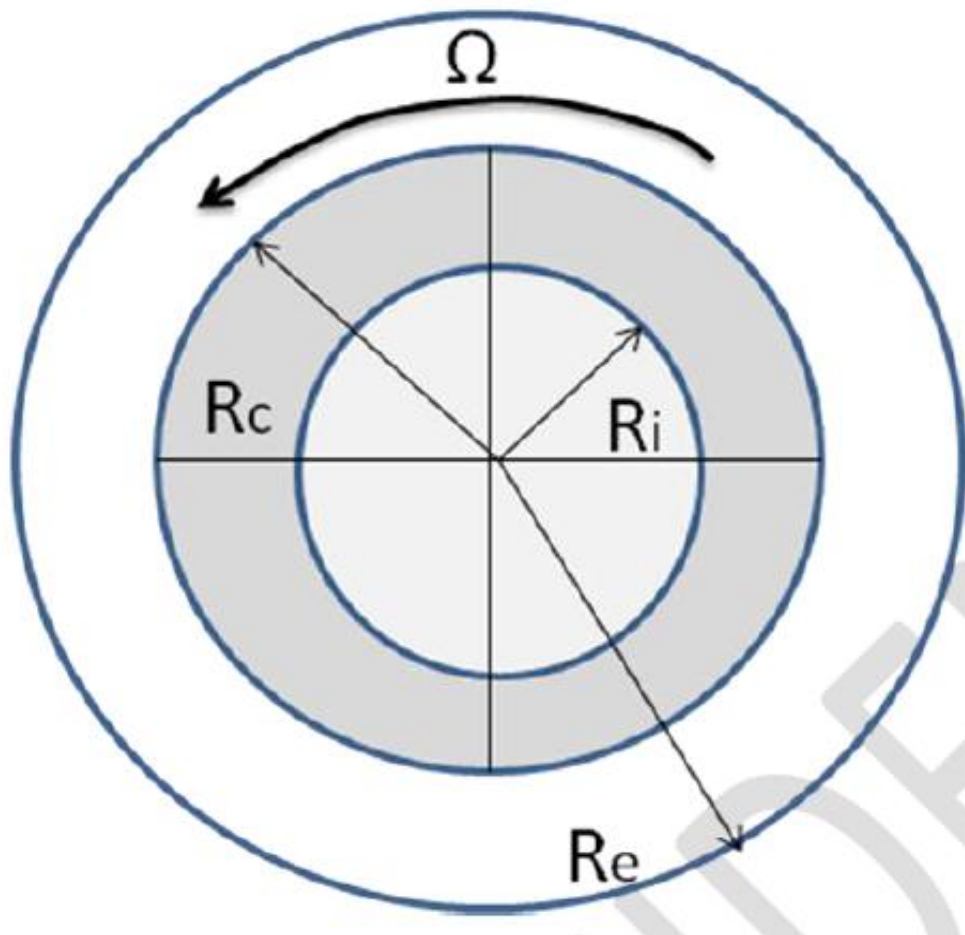


Figure.3. 13. Géométrie et dimensions du rhéomètre.

On suppose dans notre travail que le béton frais suit le modèle rhéologique Binghamien. Le Tableau.3. 2 suivant résume la nomenclature des paramètres utilisés dans le calcul.

Tableau.3. 2. Nomenclature des paramètres.

τ	[Pa]	Contrainte de cisaillement
γ	[s ⁻¹]	Gradient de vitesse
τ_0	[Pa]	Seuil de cisaillement
μ	[Pa.s]	Viscosité plastique
$\omega(r)$	[rad.s ⁻¹]	Vitesse de rotation au point r
T	[N.m]	Couple
V	[rps]	Vitesse de rotation mesurée au rhéomètre
Ω	[rad.s ⁻¹]	Vitesse angulaire du cylindre mobile
G'	[N.m]	Intersection de la courbe (couple/Vitesse) avec l'axe des abscisses)
R	[m]	Distance radiale du point mesuré
R _i	[m]	Rayon du cylindre interne
R _e	[m]	Rayon du cylindre externe
R _c	[m]	Distance de l'axe de rotation jusqu'à la couche de béton immobile
N	[m]	Hauteur de la géométrie utilisée

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3-20)$$

Selon le principe de la contrainte de Cauchy, la contrainte est liée au couple par la relation suivante :

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 n} \quad (3-21)$$

La vitesse de cisaillement γ est égale à :

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (3-22)$$

On suppose que le cylindre externe est immobile alors que le cylindre interne a un mouvement de rotation. Le béton n'est pas complètement cisailé. La partie se trouvant entre R_c et R_e est immobile. Ainsi à r=R_i, $\omega(r)=\Omega$ et à r=R_c, $\omega(r)=0$.

En remplaçant la contrainte de cisaillement (τ) et la vitesse de cisaillement (γ) par leurs expressions (3-22) et (3-23) dans l'expression (3-21), le couple est exprimé en fonction de la vitesse de rotation :

$$\frac{T}{2\pi r^2 n} = \tau_0 + \mu \left(r \frac{d\omega}{dr} \right) \quad (3-23)$$

En réarrangeant les termes et en intégrant le rayon de R_1 à R_2 et la vitesse angulaire de 0 à Ω :

$$\left(\frac{T}{2\pi r^2 n} - \tau_0 \right) \frac{1}{r} dr = \mu d\omega \quad (3-24)$$

$$\int_{R_c}^{R_c} \left(\frac{T}{2\pi r^2 n} - \tau_0 \right) \frac{1}{r} dr = \int_0^{\Omega} \mu d\omega \quad (3-25)$$

Le résultat de l'intégration est le suivant :

$$\frac{T}{4\pi n} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) - \tau_0 \ln \left(\frac{R_c}{R_i} \right) = \mu \Omega \quad (3-26)$$

La vitesse de rotation (Ω en rad/s) est remplacé par la vitesse ($V = \frac{\Omega}{2\pi}$ en rps) ainsi l'équation(7) devient:

$$T = \frac{4\pi n \ln \left(\frac{R_c}{R_i} \right)}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_c^2} \right)} \tau_0 + \frac{8\pi^2 n}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_c^2} \right)} \mu V \quad (3-27)$$

Avec le rhéomètre, la relation entre le couple (T) et la vitesse (V) est la suivante :

$$T = G' + H' V \quad (3-28)$$

Avec G' l'ordonné à l'origine et H' le coefficient directeur de la courbe du couple en fonction de la vitesse.

Par identification des paramètres des équations (3-28) et (3-29), Le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité (μ) peuvent être exprimés en fonction de G' et H' :

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_c^2} \right)}{4\pi n \ln \left(\frac{R_c}{R_i} \right)} G' \quad (3-29)$$

Et

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_c^2}\right)}{8\pi^2 n} H' \quad (3-30)$$

- b) Etapes de mesure au rhéomètre
- Choix du profil de vitesse

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation (Figure.3. 14).

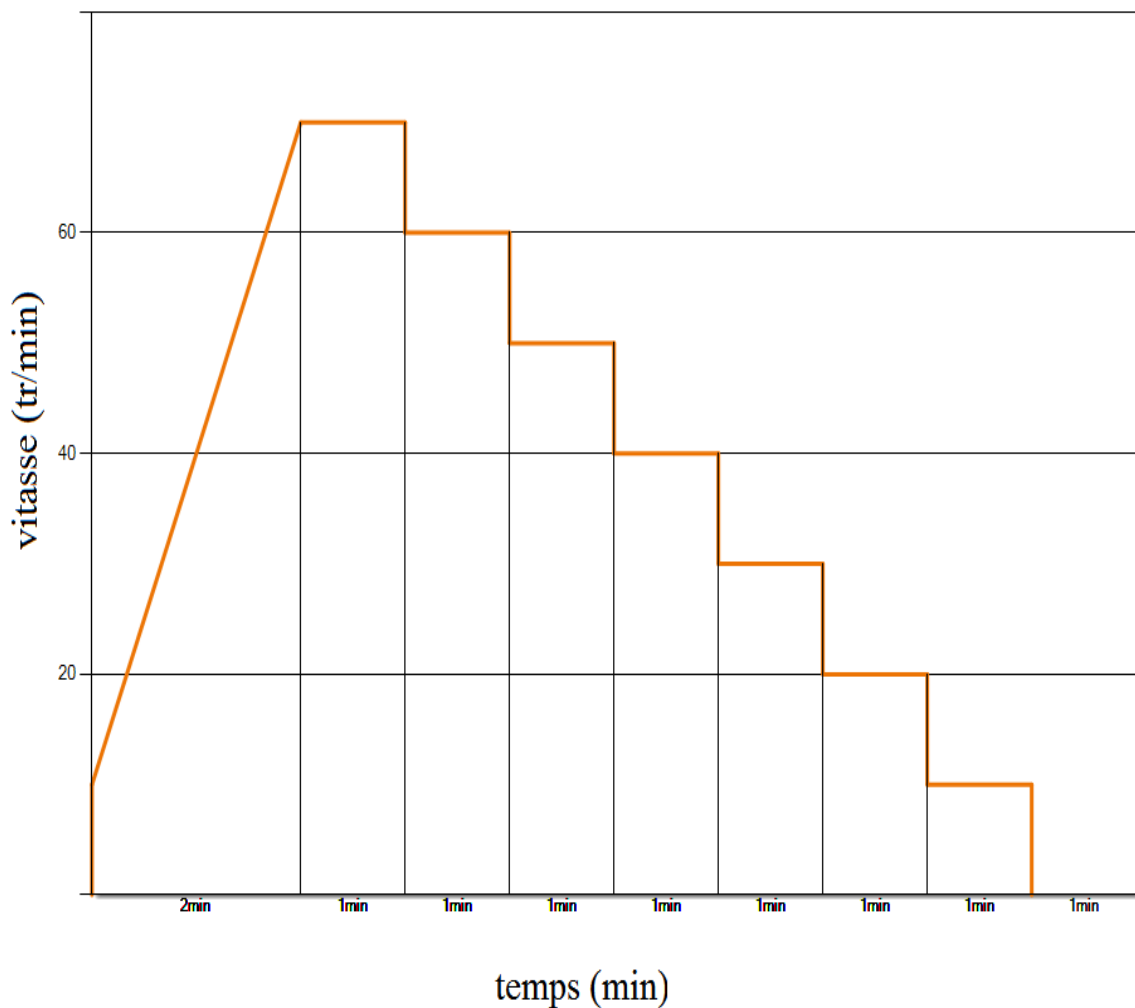


Figure.3. 14. Profil de vitesse utilisé.

➤ Etapes de mesure

- Faire tourner le rhéomètre à vide pendant environ 1 minute, à une vitesse élevée.
- Mesurer les couples à vide (T1), selon le profil de vitesse choisi.
- Mettre le béton frais dans le bol et faire centrer la géométrie (croisillon) dans le béton, ensuite prendre les mesures des couples (T2) selon le profil de vitesse choisi.
- Tracer la courbe qui représente le couple en fonction des vitesses de rotation.
- Exploiter les résultats et calculer le seuil de cisaillement (τ_0) et la viscosité plastique (μ).

3.3.2 Résultats des essais de caractérisation des matériaux

3.3.2.1 Ciment

Le Ciment utilisé dans notre travail est un ciment de type CEMI 42.5 CRS (SPA BISKIA CIMENT). (Figure.3. 15) C'est un ciment résistant aux sulfates, constitué de 95% à 100% de clinker et de 0 à 5% de calcaire.

Les exigences chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont données par le Tableau.3. 3 et Tableau.3.4 respectivement.

Tableau.3. 3. Exigences chimiques.

La teneur en (MgO)	1.49%
La teneur en (SO ₃)	2.35%
La teneur en (CL)	0.028%
La teneur en (SiO ₂)	19.43%
La teneur en (AL ₂ O ₃)	5.04%
La teneur en (FE ₂ O ₃)	6.57%
La teneur en (CAO)	64.2%
La teneur en (K ₂ O)	0.46%
La teneur en (Na ₂ O)	0.17%
La perte au feu	2.75%
Le résidu insoluble	0.75%

Tableau.3. 4. Exigences minéralogiques..

La teneur en C ₃ S en	62%
La teneur en C ₃ A en	1.5%
La teneur en C ₂ S	13%
La teneur en C ₄ AF	17%

Les résultats des essais de caractérisation physique du ciment sont récapitulés dans le Tableau.3. 5 suivant:

Tableau.3. 5. Résultats d'essais de caractérisation de ciment..

Essai	Résultat
Masse volumique spécifique, g/cm ³	3.1
Surface spécifique Blaine, cm ² /g	3420
Consistance normalisée, %	25.7
Début de prise, min	180
Expansion à chaud, mm	0.5



Figure.3. 15. Photo de sac du ciment nous utilisé.

3.3.2.2 Sable

Le sable utilisé dans notre travail est le sable alluvionnaire de la région de Laghouat. La Figure.3. 16 , qui représente une analyse par diffraction X, montre que ce sable est constitué essentiellement du quartz.

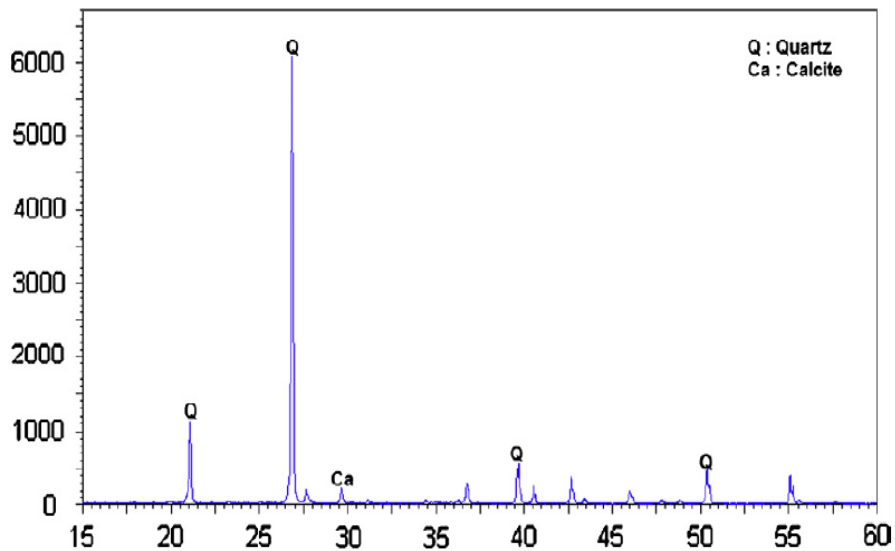


Figure.3. 16. Diffractogrammes aux rayons X du sable alluvionnaire utilisés.

L'analyse granulométrique du sable utilisé est donnée par le graphe (Figure.3. 17), suivante.

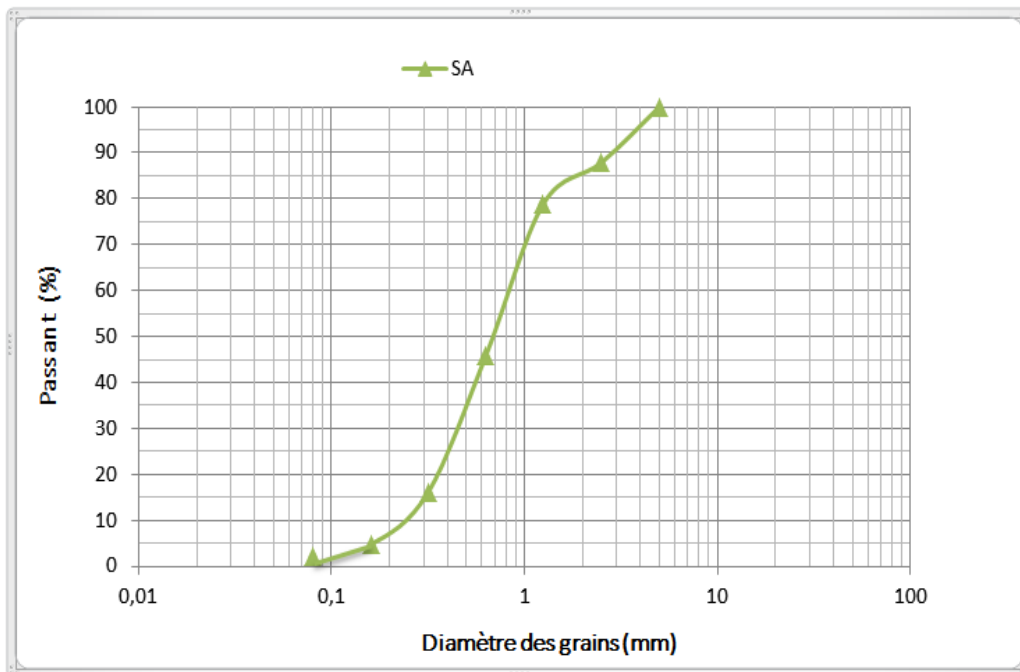


Figure.3. 17. Courbe granulométrique de sable utilisé.

3.3.2.3 L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette partie expérimentale est l'eau de robinet de laboratoire de département de Génie civil de Laghouat.

3.3.2.4 Poudre de marbre (PM)

Comme déjà mentionné, la poudre de marbre faisant l'objet de cette étude est un déchet résultant de coupage, façonnage et lustration des pierres de marbres. Cette poudre a été fournie par la société MCA (Marbre Carrelage et Agglo-marbre installée à Bordj BouArrérdj). Les propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre sont données dans le Tableau.3. 6.

Tableau.3. 6. Propriétés physico-chimiques de la poudre de marbre.

Élément	%
SiO ₂	0,42
CaO	56,01
MgO	0,12
Al ₂ O ₃	0,13
Fe ₂ O ₃	0,06
SO ₃	0,01
K ₂ O	0,01
TiO ₂	0,01
Na ₂ O	0,43
P ₂ O ₅	0,03
Pert au feu	42,78
Densité spécifique	2.7
Finesse (cm ² /g)	3600

Les résultats de l'analyse DRX de la poudre de marbre, qui sont montrés sur la Figure.3. 18 indiquent que cette poudre est constituée principalement de la calcite avec quelques traces de quartz et de dolomite

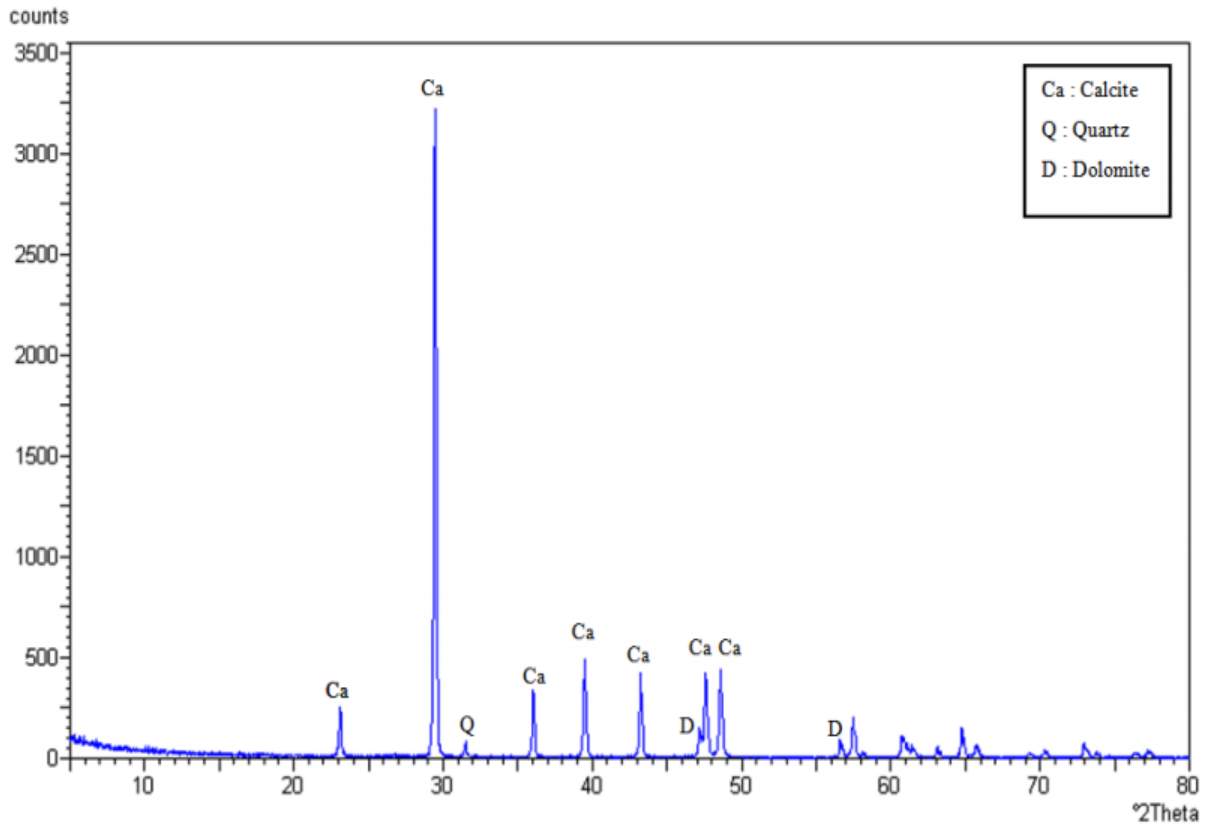


Figure.3. 18. Diffractogrammes aux rayons X de la poudre de marbre.

3.3.2.5 Granulats

Différents granulats sont utilisés un sable et deux classe de gravillon. Le sable utilisé est de type alluvionnaire, disponible en abondance dans la wilaya de Laghouat. D'après les résultats de l'analyse granulométrique des granulats ce sable présente une granulométrie continue qui est recommandé pour la production des bétons de bonnes qualités. Le gravillon et la masse volumique apparent (Figure.3. 20) et absolue (Figure.3. 19) (Tableau.3. 7) et entrant dans la composition de différents mélanges de BAP est un gravillon concassé d'origine calcaire. Deux classes de gravillon sont utilisées : 3/8 et 8/15.



Figure.3. 19. masse volumique absolue.



Figure.3. 20. la masse volumique apparent.

Tableau.3. 7. Propriétés physiques des granulats.

Granulat	Sable 0/5	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Coefficient d'absorption (%)	1.39	3.1	0.7
Masse volumique Absolue (kg/m ³)	2.6	2.57	2.56
Masse volumique Apparente (kg/m ³)	1.54	2.66	2.64
Équivalent du sable (%)	69	/	/

Le gravies utilisé dans notre travail est le gravier concassé en deux type (8/15 et 3/8) de la région de Laghouat.

L'analyse granulométrique du gravier utilisé est représenté graphiquement par la Figure.3. 21 et Figure.3. 22:

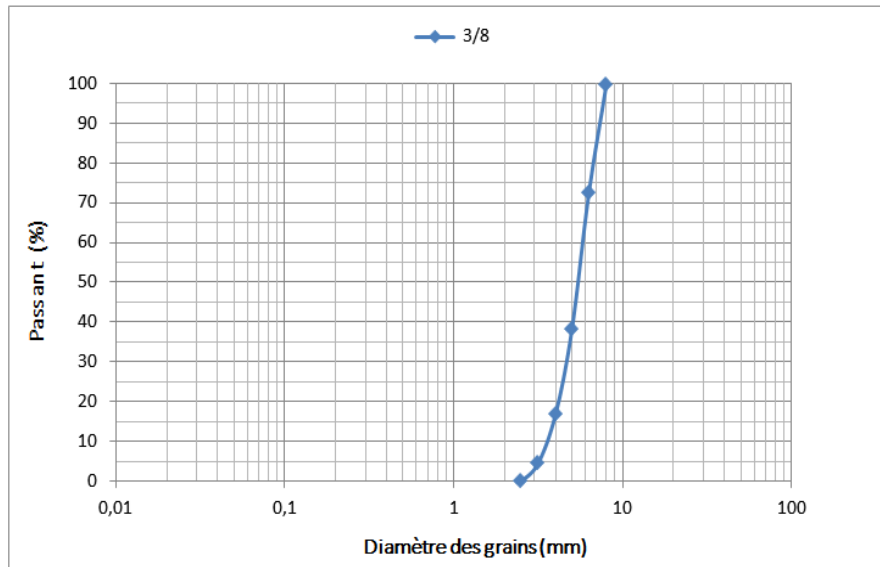


Figure.3. 21. Courbe granulométrique de gravier 3/8 utilisé.

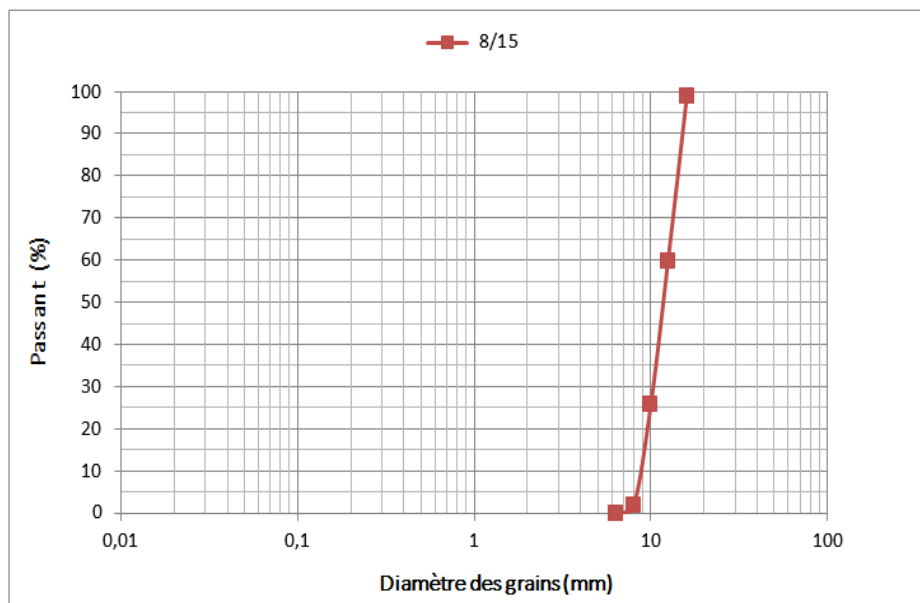


Figure.3. 22. Courbe granulométrique de gravier 8/15 utilisé.

3.3.2.6 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé tout au long de cette étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération Medaflow 30. Cet adjuvant, qui a été fourni par la société Granitex (Alger-Algérie), est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci. Le superplastifiant Medaflow 30 est un liquide de couleur jaunâtre, de pH égal à 6 et de densité de 1,07. L'extrait sec de cet adjuvant représente 30% de sa quantité.

3.3.2.7 Formulation

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. En général, la formulation du béton dépend des caractéristiques souhaitées à l'état frais et à l'état durci. La formulation des bétons conventionnels dépend de deux caractéristiques qui sont choisies préalablement : La consistance souhaitée et de la résistance caractéristique (à 28 jours). Pour les BAP, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être en balance pour obtenir un bon BAP.

Grace à l'évolution du BAP à travers le monde, de nombreuses méthodes de formulation ont été publiées. La méthode de formulation qui sera utilisée dans le présent travail est la méthode basée sur les recommandations de l'AFGC [2008].

3.3.2.8 Procédure de malaxage

La différence majeure entre la composition du BAP et celle du béton courant est la présence du superplastifiant dans le premier.

L'objectif de l'utilisation de cet adjuvant est d'obtenir un BAP de grande fluidité [Girish et al, 2010]. Cette dernière est cependant liée principalement au temps d'addition du superplastifiant durant le processus de malaxage, c'est-à-dire au début ou au cours de ce processus, et à la durée de malaxage du mélange. Domone et Jin [1999.] ont montré que le temps optimum d'addition du superplastifiant à base de polycarboxylates est 0,5 à 2 min après le début du processus de malaxage. Un tel temps permet d'obtenir un mélange de grande fluidité et de meilleur maintien d'ouvrabilité. Boukendakdji [2010] a rapporté que l'efficacité du SP est d'autant plus grande lorsqu'il est ajouté (avec 30% de l'eau) après l'humidification du béton (70% de l'eau de gâchage ajouté au début de malaxage).

En ce qui concerne la durée de malaxage, les BAP ont une durée de malaxage plus longue, ce qui a pour effet d'assurer une meilleure dispersion des particules de la poudre par le superplastifiant. Certains auteurs [Khayat et al 1999], [Girish, et al 2010] ont proposé des durées de malaxage variant entre 3 et 4 min. Pedersen et Smelpass [2003] ont rapporté qu'une durée de malaxage excédant 5 min est préférée.

Une fois que toutes les quantités seront calculées et pesées, on procède à un malaxage sec de la poudre, du sable et des gravillons pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange. Puis

on ajout 70% de l'eau de gâchage avec un début régulier dans les 60 secondes suivantes. Durant toute la minute suivante, on introduit régulièrement le superplastifiant avec l'eau restante (après les avoir mélangé). Le malaxage continue pendant 5 autres minutes. Le malaxage est arrêté ensuite après 2 minutes, puis recommencé durant 30 secondes avant le déchargement. La Figure.3. 23 récapitule toutes ces étapes.

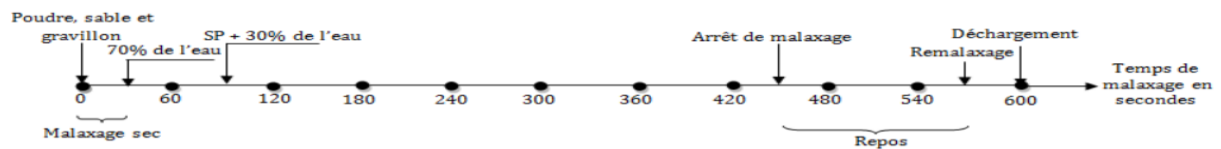


Figure.3. 23. Procédure de malaxage du béton autoplaçant.

Notons ici qu'on a utilisé un malaxeur mobile à axe vertical de capacité de 40 l.



Figure.3. 24. Photos Malaxeur utilisé.

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

4.1. Introduction

Dans cette partie, nous présentons les résultats des essais et la discussion de ces résultats. L'influence de différents paramètres étudiés (rapport E/C, rapport poudre de marbre/ ciment (PM/C), Rapport G/S, Rapport gravier (3/8)/gravier (8/15) (G1/G2) et le dosage du superplastifiant (SP)) sur les propriétés à l'état frais des mélanges de BAP (Etalement (Eta), Temps d'écoulement (T50), Stabilité au cylindre (Sc), Stabilité à la colonne (ISS), Stabilité au tamis (Pi) et les paramètres rhéologique : taux de cisaillement (Tau) et la viscosité plastique (Vp)) en appliquant la méthode basée sur les plans d'expériences.

4.2. Préparation de l'étude

Le travail consiste à étudier l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais (ci-dessus) et d'établir d'éventuelles relations entre ces paramètres (notamment rhéologiques) sur la stabilité statique des BAP élaborés.

4.2.1 Choix des réponses

On désigne par réponse toutes grandeurs mesurées en variant les paramètres de formulation. Comme cité ci-dessus, Les réponses choisies sont :

- Etalement (Eta, en cm))
- Temps d'écoulement, (T50, en s),
- Stabilité au cylindre (Sc, en mm),
- Stabilité à la colonne (ISS),
- Stabilité au tamis (Pi, %).
- Taux de cisaillement (Tau, en Pa).
- Viscosité plastique (Vp, en Pa.s).

4.2.2 Choix des facteurs

Les facteurs étudiés, qui seront utilisés dans les modèles mathématiques des réponses sont:

- Le rapport eau/ciment (E/C),
- Le rapport gravier/sable (G/S).
- Le rapport poudre de marbre /ciment (MP/C).
- Le dosage de superplastifiant (Sp , %).
- Le rapport de gravier $_{3/8}$ / gravier $_{8/15}$ (G1/G2).

4.2.3 Définition des niveaux des facteurs

Les niveaux des facteurs sont donnés dans le Tableau.4. 1:

Tableau.4. 1.Niveaux des facteurs retenus.

Facteurs	Niveau (-1.607)	Niveau (-1)	Niveau (0)	Niveau (+1)	Niveau (+1.607)
G1/G2	0	18.89	50	81.11	100
G/S	0.68	0.8	1	1.2	1.32
MP/C	0	4.72	12.5	20.28	25
E/C	0.35	0.36	0.375	0.39	0.40
Sp (%)	0.8	0.84	09	0.96	1

Le Tableau.4. 2 indique les compositions des points factoriels, des points axiaux et des points centraux du plan d'expériences choisi. Les combinaisons entre les points factoriels, axiaux et centraux ont été réalisées à l'aide de logiciel statistique JMP7 [JMP, 2007].

Tableau.4. 2. Proportions et résultats d'essais.

N°	PROPORTIONS					
	Config.	G ₁ /G ₂	G/S	MP/C	E/C	Sp (%)
1	Axial	0	1	12,5	37,5	0,9
2	Factoriel	18,89	0,8	4,72	36	0,84
3	Factoriel	18,89	0,8	4,72	39	0,96
4	Factoriel	18,89	0,8	20,28	36	0,96
5	Factoriel	18,89	0,8	20,28	39	0,84
6	Factoriel	18,89	1,2	4,72	36	0,96
7	Factoriel	18,89	1,2	4,72	39	0,84
8	Factoriel	18,89	1,2	20,28	36	0,84
9	Factoriel	18,89	1,2	20,28	39	0,96
10	Axial	50	0,68	12,5	37,5	0,9
11	Axial	50	1	0	37,5	0,9
12	Axial	50	1	12,5	35	0,9
13	Axial	50	1	12,5	37,5	0,8
14	Central	50	1	12,5	37,5	0,9
15	Central	50	1	12,5	37,5	0,9
16	Central	50	1	12,5	37,5	0,9
17	Central	50	1	12,5	37,5	0,9
18	Central	50	1	12,5	37,5	0,9
19	Axial	50	1	12,5	37,5	1
20	Axial	50	1	12,5	40	0,9
21	Axial	50	1	25	37,5	0,9
22	Axial	50	1,32	12,5	37,5	0,9
23	Factoriel	81,11	0,8	4,72	36	0,96
24	Factoriel	81,11	0,8	4,72	39	0,84
25	Factoriel	81,11	0,8	20,28	36	0,84
26	Factoriel	81,11	0,8	20,28	39	0,96
27	Factoriel	81,11	1,2	4,72	36	0,84
28	Factoriel	81,11	1,2	4,72	39	0,96
29	Factoriel	81,11	1,2	20,28	36	0,96
30	Factoriel	81,11	1,2	20,28	39	0,84
31	Axial	100	1	12,5	37,5	0,9

4.3. Résultats des essais

Les résultats des essais des BAP en fonction de paramètres étudiés sont récapitulés dans le Tableau suivant:

Tableau.4. 3. Résultats des essais.

N°	Eta(cm)	T50(s)	Sc (mm)	ISS	Pi(%)	Vp(Pa.s)	Tau (Pa)
1	83	1,21	50	16,40	56,81	4,168	63,191
2	75	1,72	40	14,89	40,21	3,284	89,476
3	66	2,09	3	0,71	8,22	15,482	12,198
4	85	1,2	50	15,48	60,82	8,254	44,758
5	73	1,58	4	7,59	20,88	10,963	207,97
6	51	6,32	0	0,40	0	28,554	35,579
7	72	1,73	16	10,55	22,82	9,26	-0,329
8	65	3,63	4	0,37	1,69	34,66	201,336
9	64	3,31	1	0,47	0,8	34,691	36,921
10	75	1,55	30	10,01	20,65	6,397	38,791
11	72	1,48	19	5,634	14,65	5,827	-26,156
12	75	1,77	17	9,59	12,17	16,472	-4,393
13	69,5	3,15	3	4,52	2,97	13,594	-25,675
14	77	2,46	24,5	3,42	9,03	19,014	-19,663
15	77	2,54	24	2,56	14,99	18,881	-31,368
16	82	1,37	40	10,32	11,72	19,059	-23,902
17	76	2,62	18	7,22	14,98	18,901	-31,507
18	79	1,57	25	5,40	23,61	18,219	-48,687
19	78,5	1,26	33	3,23	15,13	22,197	13,723
20	77	2,17	24	0,34	8,21	8,506	6,537
21	78	1,23	35	9,29	19,72	6,117	36,855
22	74	0,91	16	2,76	14,26	4,599	19,537
23	74,5	1,52	4	9,09	7,04	8,318	16,71
24	77	0,96	6	3,27	10,72	7,457	2,697
25	71	3,21	13,5	6,78	10,14	13,997	-8,917
26	79	1,46	34	6,77	12,89	10,865	113,924
27	73,5	1,16	29	0,17	28,95	1,462	86,533
28	72	1,01	27	7,77	16,91	1,956	34,138
29	76	1,31	16	7,58	16,96	6,173	22,332
30	73	1,62	14	2,36	15,33	6,856	14,632
31	76	1,29	6	9,99	7,68	11,216	63,191

La préparation et l'analyse des résultats des expériences, réalisés selon les compositions du Tableau.4. 3, sont effectuées à l'aide du logiciel statistique *JMP7* [JMP, 2007]. Tous les coefficients des modèles mathématiques ont été trouvés par une méthode de régression basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés.

Nous présentons ci-dessous les résultats des modélisations effectuées :

4.3.1. Modèles mathématiques

Les coefficients issus de la modélisation, les coefficients de corrélation (R^2), les rapports-t et les probabilités p-value des réponses sont regroupés dans le Tableau.4. 4. D'après ce tableau, les modèles retenus des réponses s'écrivent respectivement comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Eta(cm)} = & 78.139 + 1.595 * \frac{G1}{G2} - 2.627 * \frac{G}{S} + 1.637 * \frac{F}{C} + 0.116 * Sp + 2.5 * \frac{G1}{G2} * \frac{G}{S} - 1.313 * \frac{G1}{G2} * \frac{F}{C} + 1.625 \\ & * \frac{G1}{G2} * Sp - 1.813 * \frac{G}{S} * Sp + 3.5 * \frac{F}{C} * Sp - 1.989 * \left(\frac{G}{S}\right)^2 - 1.766 * \left(\frac{F}{C}\right)^2 - 2.183 * Sp^2 \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \text{T50(s)} = & 1.766 - 0.435 * \frac{G1}{G2} + 0.251 * \frac{G}{S} + 0.019 * \frac{F}{C} - 0.268 * \frac{E}{C} - 0.020 * Sp - 0.653 * \frac{G1}{G2} * \frac{G}{S} + 0.318 * \frac{G1}{G2} * \frac{F}{C} \\ & - 0.369 * \frac{G1}{G2} * Sp + 0.313 * \frac{G}{S} * Sp - 0.508 * \frac{F}{C} * Sp + 0.267 * Sp^2 \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} \text{Sc (mm)} = & 25.715 - 2.136 * \frac{G1}{G2} - 3.307 * \frac{G}{S} + 1.758 * \frac{F}{C} - 1.902 * \frac{E}{C} + 2.679 * Sp + 6.531 * \frac{G1}{G2} * \frac{G}{S} - 5.344 * \frac{G}{S} \\ & * \frac{F}{C} + 5.512 * \frac{G1}{G2} * \frac{E}{C} + 4.344 * \frac{G}{S} * \frac{E}{C} + 7.656 * \frac{F}{C} * Sp - 3.559 * \left(\frac{E}{C}\right)^2 - 4.527 * Sp^2 \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \text{ISS} = & 6.387 - 0.798 * \frac{G1}{G2} - 2.191 * \frac{G}{S} + 0.309 * \frac{F}{C} - 1.424 * \frac{E}{C} + 0.005 * Sp + 1.175 * \frac{G1}{G2} * \frac{G}{S} - 1.05 * \frac{G}{S} * \frac{F}{C} \\ & + 2.537 * \frac{G}{S} * \frac{E}{C} + 2.187 * \frac{G1}{G2} * Sp + 1.512 * \frac{F}{C} * Sp - 1.15 * \frac{E}{C} * Sp + 2.227 * \left(\frac{G1}{G2}\right)^2 - 0.967 \\ & * \left(\frac{E}{C}\right)^2 - 1.393 * Sp^2 \end{aligned} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} \text{Pi(\%)} = & 14.699 - 4.454 * \frac{G1}{G2} - 3.672 * \frac{G}{S} + 0.604 * \frac{F}{C} - 3.005 * \frac{E}{C} - 0.357 * Sp + 8.686 * \frac{G1}{G2} * \frac{G}{S} - 4.527 * \frac{G}{S} * \frac{F}{C} \\ & + 2.672 * \frac{G1}{G2} * \frac{E}{C} + 4.61 * \frac{G}{S} * \frac{E}{C} - 2.571 * \frac{G}{S} * Sp + 7.122 * \frac{F}{C} * Sp + 6.033 * \left(\frac{G1}{G2}\right)^2 - 2.949 \\ & * Sp^2 \end{aligned} \quad (4-5)$$

Tableau.4. 4. Coefficients et paramètres des modèles des réponses (en valeurs codées).

Facteurs du modèle	Eta(cm)			T50(s)			Sc (mm)			ISS			Pi(%)			Tau (Pa)			Vp (Pa.s)		
	R ² =0.72			R ² =0.67			R ² =0.66			R ² =0.85			R ² =0.80			R ² =0.91			R ² =0.68		
	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t	Estim.	Rapport t	Prob.> t
Constante	78.14	54.94	<.0001	1.77	8.87	<.0001	25.72	7.98	7.98	6.39	7.86	<.0001	14.7	5.94	<.0001	-28.08	-3.16	0.006	-28.08	-3.16	0.006
G1/G2	1.59	1.71	0.1043	-0.44	-2.53	0.02	-2.14	-0.91	-0.91	-0.8	-1.5	0.15	-5.45	-3.02	0.008	-21.11	-3.9	0.001	-21.1	-3.9	0.001
G/S	-2.63	-2.82	0.0114	0.25	1.46	0.16	-3.31	-1.41	-1.41	-2.19	-4.11	0.001	-3.67	2.04	0.058	21.82	4.04	0.001	21.8	4.03	0.001
F/C	1.64	1.76	0.0961	0.02	0.11	0.91	1.76	0.75	0.75	0.311	0.58	0.57	0.6	0.33	0.742	-17.79	-3.29	0.005	-17.8	3.29	0.005
Sp	0.12	0.12	0.9020	-0.02	-0.12	0.91	2.68	1.14	1.14	0.005	0.01	0.99	-0.36	-0.20	0.85	12.86	2.38	/	12.86	2.38	0.03
G1/G2*G/S	2.5	2.33	0.0315	-0.65	-3.31	0.004	6.53	2.42	2.42	1.175	1.92	0.07	8.87	4.28	0.001	/	/	/	/	/	/
G1/G2*F/C	-1.31	-1.22	0.2367	0.32	1.6	0.12	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
G1/G2*Sp	1.63	1.52	0.1470	-0.37	-1.87	0.08	/	/	/	2.19	3.57	0.003	/	/	/	-24.5	-3.64	0.001	-24.5	-3.94	0.001
G/S*Sp	-1.81	-1.69	0.1082	0.31	1.56	0.13	/	/	/	/	/	/	-2.57	1.24	0.232	23.35	3.75	0.002	23.35	3.75	0.001
F/C*Sp	3.5	3.26	0.0043	-0.51	-2.57	0.02	7.66	2.83	2.83	1.51	2.47	0.03	7.12	3.43	0.003	/	/	/	/	/	/
G/S*G/S	-1.99	-1.77	0.0933	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	26.71	4.09	0.001	26.71	4.09	0.001
F/C*F/C	-1.98	-1.60	0.1271	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	21.2	3.24	0.001	21.2	3.24	0.005
Sp*Sp	-2.18	-1.94	0.0676	0.27	1.3	0.21	-4.53	-1.61	-1.61	-1.39	-2.17	0.05	-2.95	-1.36	0.2	/	/	/	/	/	/
E/C	/	/	/	-0.27	-1.56	0.14	-1.90	-0.81	-0.81	-1.42	-2.67	0.02	-3.01	1.67	0.114	4.66	0.86	0.4	4.66	0.86	0.4
G/S*F/C	/	/	/	/	/	/	-5.34	-1.98	-1.98	-1.05	-1.71	0.11	-4.53	-2.18	0.04	/	/	/	/	/	/
G1/G2*E/C	/	/	/	/	/	/	5.53	2.05	2.05	/	/	/	2.67	1.29	0.2150	-8.86	-3.94	0.17	-8.86	-1.42	0.17
G/S*E/C	/	/	/	/	/	/	4.34	1.61	1.61	2.54	4.14	0.001	4.61	2.22	0.04	/	/	/	/	/	/
E/C*E/C	/	/	/	/	/	/	-3.56	-1.26	-1.26	-0.97	-1.51	0.2	/	/	/	10.01	1.53	0.15	10	1.53	0.15
E/C*Sp	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-1.2	-1.88	0.08	/	/	/	9.67	1.55	0.14	9.67	1.55	0.14
G1/G2*G1/G2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2.23	3.47	0.003	6.03	2.79	0.0126	27.68	4.23	0.001	27.68	4.23	0.001
F/C*E/C	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	24.2	3.89	0.005	24.2	3.89	0.001

4.3.1.1. Analyse de la variance

Les analyses de la variance de chacune des réponses modélisées sont présentées dans le Tableau suivant :

Tableau.4. 5. Analyse de la variance des réponses.

Réponse	Source de variation	Degré de liberté (DDL)	Somme des carrés des écarts (SCE)	Estimation de la variance	Rapport F
Eta (cm)	Modèle	12	889.8305	74.1525	4.0320
	Résidus	18	331.0404	18.3911	Prob. > F
	Total	30	1220.8710	P-value = 0.0040	
T50(s)	Modèle	11	24.260484	2.20550	3.5373
	Résidus	19	11.846465	0.62350	Prob. > F
	Total	30	36.106948	P-value = 0.0077	
Sc (mm)	Modèle	12	4034.5162	336.210	2.8807
	Résidus	18	2100.8225	116.712	Prob. > F
	Total	30	6135.3387	P-value = 0.0210	
ISS	Modèle	14	541.67048	38.6907	6.4472
	Résidus	16	96.01919	6.0012	Prob. > F
	Total	30	637.68968	P-value = 0.0003	
Pi(%)	Modèle	13	4696.1426	361.242	5.2434
	Résidus	17	1171.2134	68.895	Prob. > F
	Total	30	5867.3560	P-value = 0.0010	
Tau (Pa)	Modèle	14	99038.52	7074.18	11.4216
	Résidus	16	9909.89	619.37	Prob. > F
	Total	30	108948.42	P-value <.0001	
Vp (Pa.s)	Modèle	11	1573.6229	143.057	3.7446
	Résidus	19	725.8730	38.204	Prob. > F
	Total	30	2299.4960	P-value = 0.0057	

On remarque d'après ce Tableau. 7 que les Rapports F (de Fisher) de toutes les réponses sont largement grands. Ils sont tous supérieurs à 1, ce qui est confirmé aussi par les faibles valeurs de p-values. On remarque aussi que les réponses possèdent des coefficients de corrélations

acceptables sauf dans le cas de des réponses Sc, ISS et Vp ($R^2=0.67$, $R^2=0.66$ et $R^2=0.68$ respectivement).

Donc on peut dire que les modèles postulés ne représentent pas uniquement la moyenne des mesures et les variations des réponses sont bien dues aux variations des facteurs.

4.3.1.2. *Présentation des résultats*

a) Etalement (Eta)

La Figure.4. 1 donne un exemple de variation de l'étalement en fonction de G/S et de G1/G2.

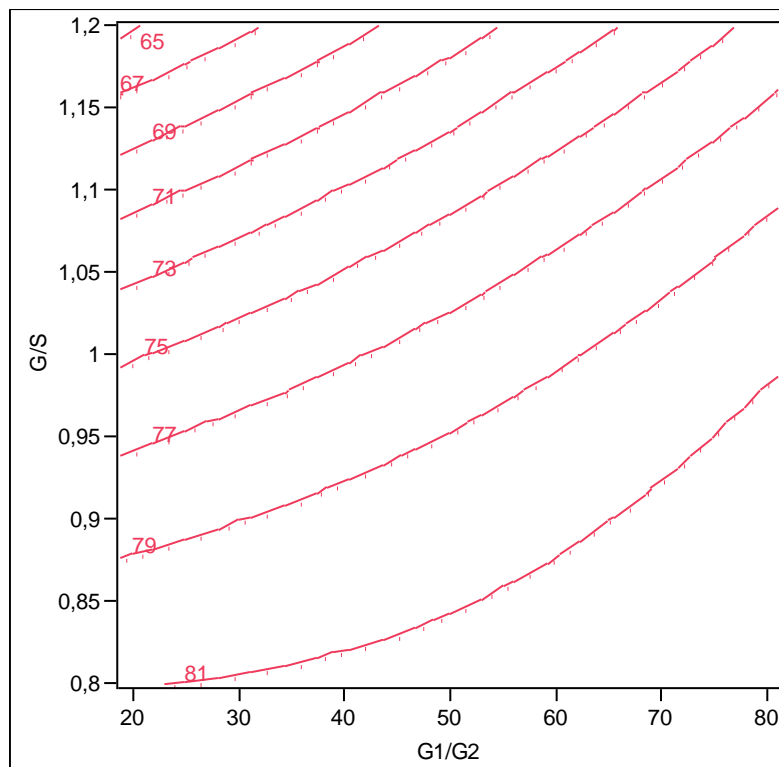


Figure.4. 1. Etalement, en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20% ; SP=1%).

D'après cette figure, on constate que l'étalement augmente avec l'augmentation du rapport G1/G2 et qui diminue avec l'augmentation du rapport G/S. L'augmentation du rapport G1/G2 conduit à l'augmentation de la quantité du gravier 3/8 par rapport à celle du gravier 8/15. L'amélioration de l'étalement en fonction de l'augmentation du rapport G1/G2 peut être à l'origine de l'amélioration de la compacité du mélange granulaire et par conséquent on aura plus de pâte pour fluidifier le mélange.

Par contre, l'augmentation de la quantité de gravier (3/8 et 8/15) au détriment du sable diminue l'étalement du BAP.

b) Temps d'écoulement (T50)

La Figure.4. 2 donne un exemple de la variation de T50 en fonction de la Sp et de la G/S. On remarque d'après cette figure que T50 augmente en fonction de l'augmentation de G/S, par contre il diminue en fonction de l'augmentation de G1/G2.

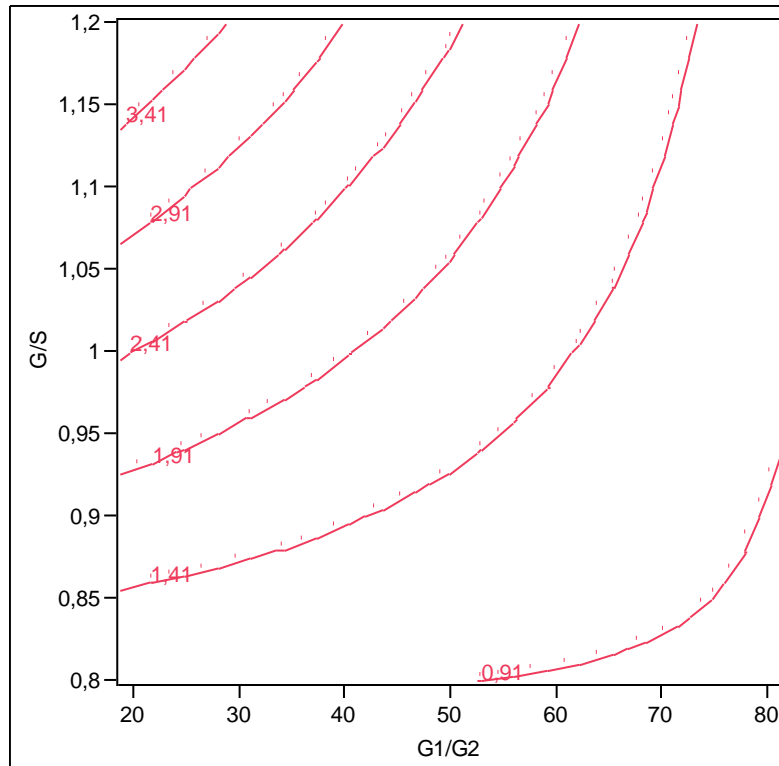


Figure.4. 2.Variation de T50 en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%)

L'augmentation du temps d'écoulement T50 en fonction de l'augmentation du rapport G/S peut être expliquée par l'augmentation de la viscosité du BAP. L'augmentation de la viscosité du mélange est probablement causée par la diminution de la compacité du mélange granulaire à cause de l'augmentation de gros granulats par rapport au sable. Par contre, l'augmentation du rapport G1/G2 le temps d'écoulement T50 diminue, ce qui confirme l'amélioration de la fluidité.

c) Essai au cylindre (Sc)

La Figure.4. 3 donne un exemple de variation de la stabilité mesurée au cylindre (Sc) en fonction de G/S et de G1/G2. D'après cette figure, on constate que l'augmentation du rapport G/S et/ou du rapport G1/G2 diminue les valeurs de stabilité Sc. Cela peut être expliqué par l'amélioration de la compacité du mélange en fonction de l'augmentation de G1 par rapport à

G2 et la diminution de la compacité en fonction de la diminution de sable par rapport au gravier.

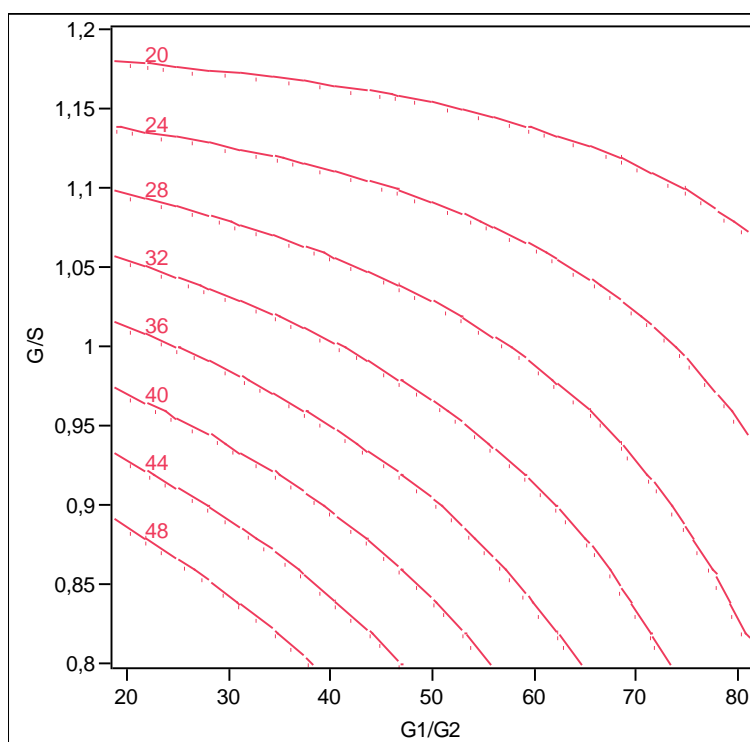


Figure.4. 3. Variation de Sc , en courbes isoréponses, en fonction de G/S et $G1/G2$ ($MP/C=20\%$. $Sp=1\%$)

d) Indice de ségrégation (ISS)

La Figure.4. 4 ci-dessous montre la variation de l'indice ISS en fonction de G/S et de $G1/G2$.

On constate d'après cette figure que l'ISS diminue en fonction de l'augmentation du rapport G/S , par contre, on remarque dans le cas de rapport $G1/G2$, qu'il diminue en fonction de l'augmentation du rapport $G1/G2$ jusqu'à une valeur minimale, puis il augmente (pour des valeurs du rapport $G1/G2$ entre 30% et 40%).

e) Stabilité au tamis (P_i)

D'après la Figure.4. 5 ci-dessous, on constate que l'augmentation du rapport G/S améliore la stabilité du BAP par la diminution du pourcentage de laitance, par contre, dans le cas du rapport $G1/G2$, on remarque qu'elle diminue en fonction de l'augmentation du rapport $G1/G2$ jusqu'à une valeur minimale, puis elle augmente (pour des valeurs variable du rapport $G1/G2$ à partir de 55%, pour des valeurs de G/S supérieur à 1).

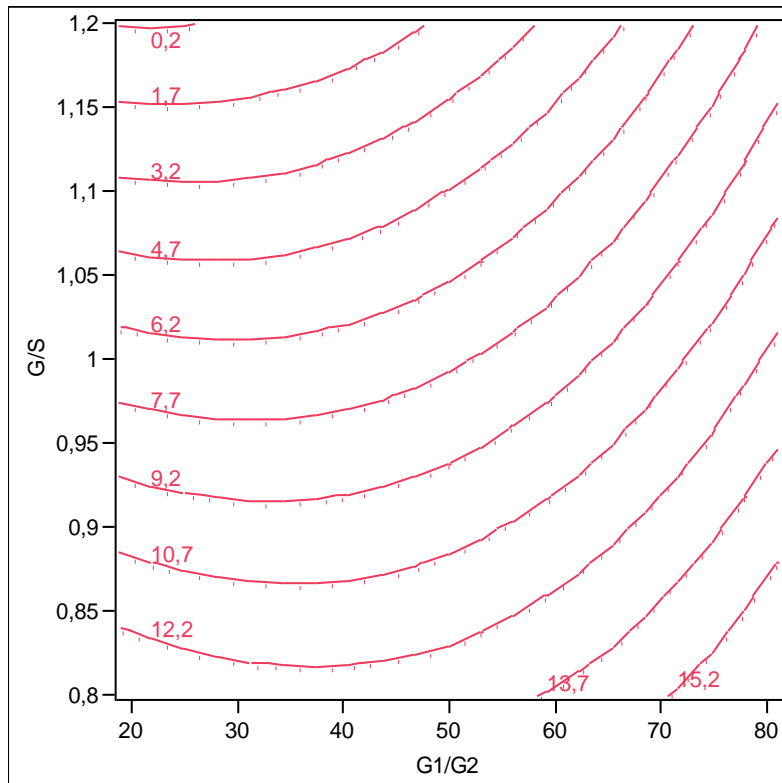


Figure.4. 4. Variation de la stabilité ISS , en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%)

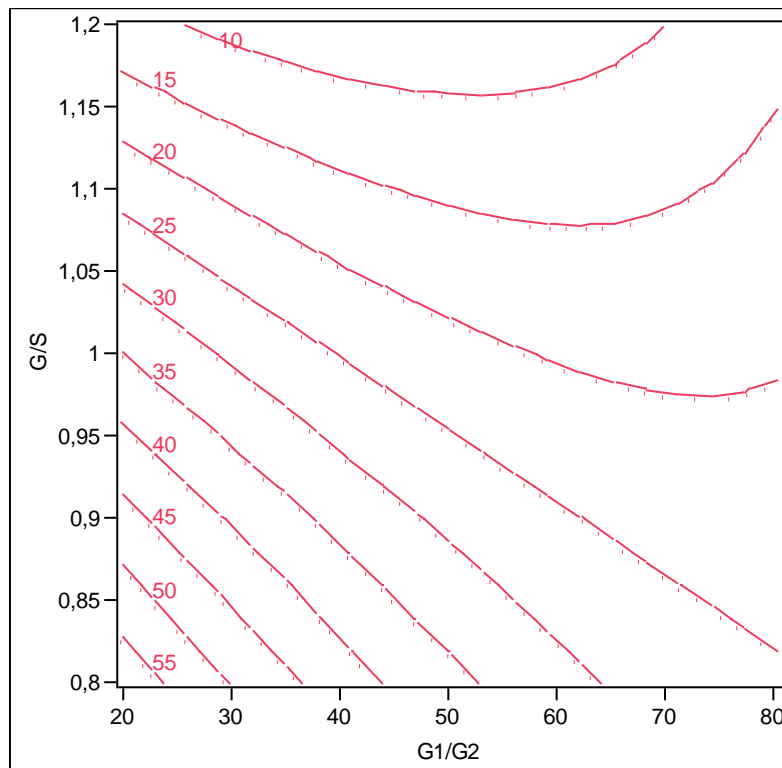


Figure.4. 5. Variation de la stabilité au tamis Pi en (%), en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%)

f) Seuil de cisaillement (Tau)

La Figure.4. 6 donne un exemple de variation du seuil de cisaillement en fonction de G/S et de G1/G2. D'après cette figure, on constate que l'augmentation du rapport G/S augmente le seuil de cisaillement, et l'augmentation du rapport G1/G2 diminue les valeurs de seuil de cisaillement. Dans le cas du rapport G/S, l'augmentation du seuil de cisaillement est peut être dû à l'augmentation de la porosité du mélange granulaire (gravier+ sable), ce qui va diminuer le volume de pâte nécessaire pour la fluidification du BAP, et par conséquence le seuil de cisaillement augmente. c. Dans ce cas, on peut attribuer cette diminution par l'amélioration de la compacité du mélange granulaire (gravier 3/8 et gravier 8/15).

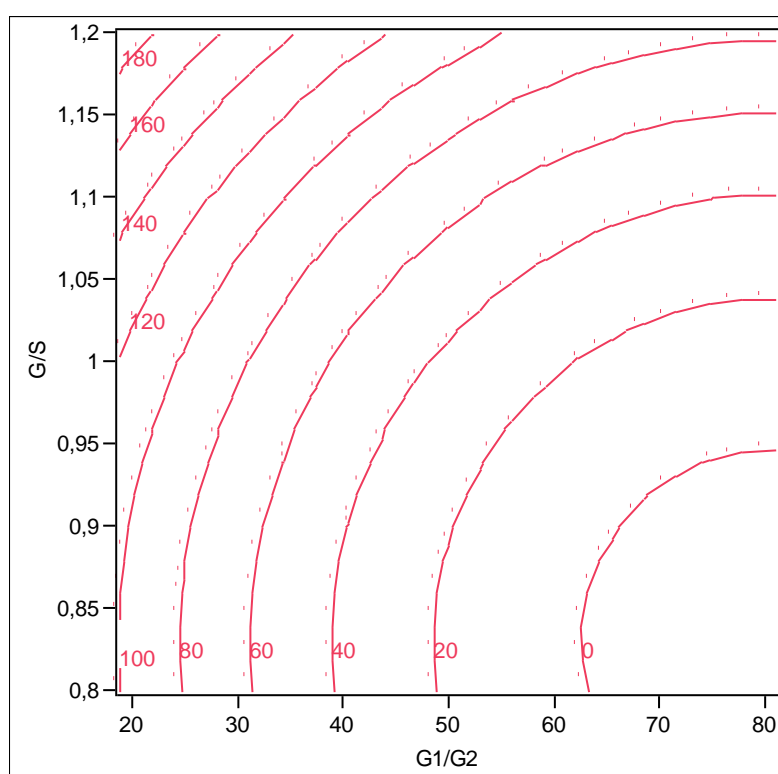


Figure.4. 6. Variation de seuil de cisaillement τ en (Pa), en courbes isoréponses, en fonction de G/S et G1/G2 (MP/C=20%. Sp=1%)

g) Viscosité plastique (Vp)

La Figure.4. 7, donne un exemple de la variation de viscosité plastique en fonction de la variation du rapport G/S et de rapport G1/G2. On constate que l'effet de variation de G/S et de G1/G2 sur la viscosité plastique est similaire à celui sur le seuil de cisaillement. En effet, l'augmentation du rapport G1/G2 diminue la viscosité du BAP. Par contre, dans le cas du rapport G/S, on remarque qu'elle augmente en fonction de l'augmentation du rapport G/S puis

elle diminue pour des valeurs de $G1/G2$ supérieures à 50% et des valeurs de G/S supérieures à environ 1.

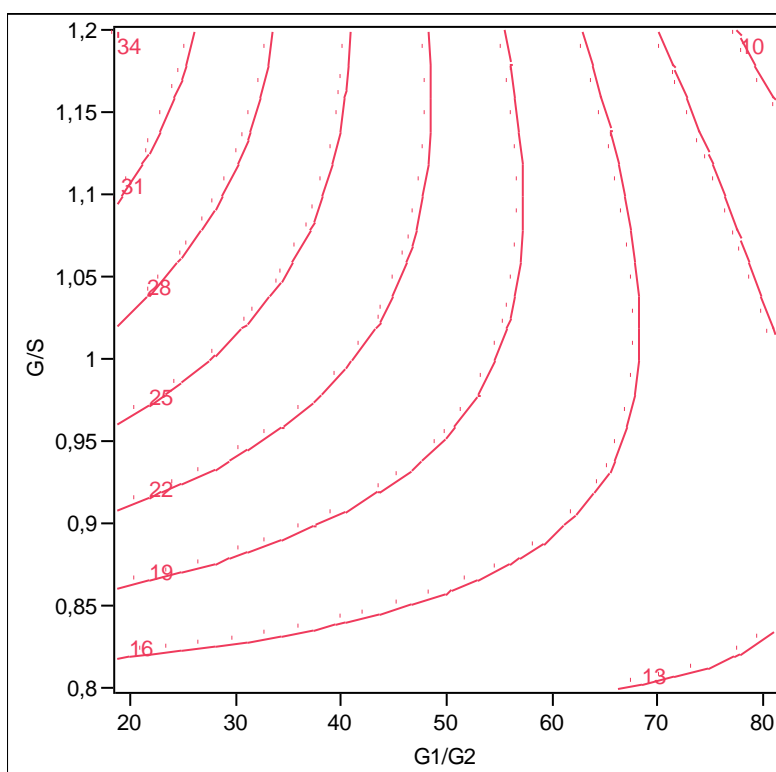


Figure.4. 7. Variation de la Viscosité plastique V_p en (Pa.s), en courbes isoréponses, en fonction de G/S et $G1/G2$ (MP/C=20%. $S_p=1\%$)

4.3.1.3. Corrélation entre paramètres rhéologiques et stabilité statique

Les résultats de corrélation entre les paramètres rhéologiques (τ et V_p) d'une part et les résultats des essais de caractérisation de la stabilité (P_i , S_c et ISS) d'autre part, montre que la corrélation entre les résultats de stabilité ISS et les paramètres rhéologiques est faible (cela est peut-être dû aux problèmes liés à l'expérience de la stabilité à la colonne (ISS)). Même chose pour les corrélations entre la stabilité au tamis (P_i) et τ d'une part et la stabilité au cylindre (S_c) et V_p qui sont faible.

Par contre de bonnes corrélations entre la stabilité P_i et V_p d'une part et entre la stabilité S_c avec τ ont été trouvées :

a) Corrélation entre τ et S_c

La Figure.4. 8 représente les résultats de corrélation entre le seuil de cisaillement et la stabilité au cylindre

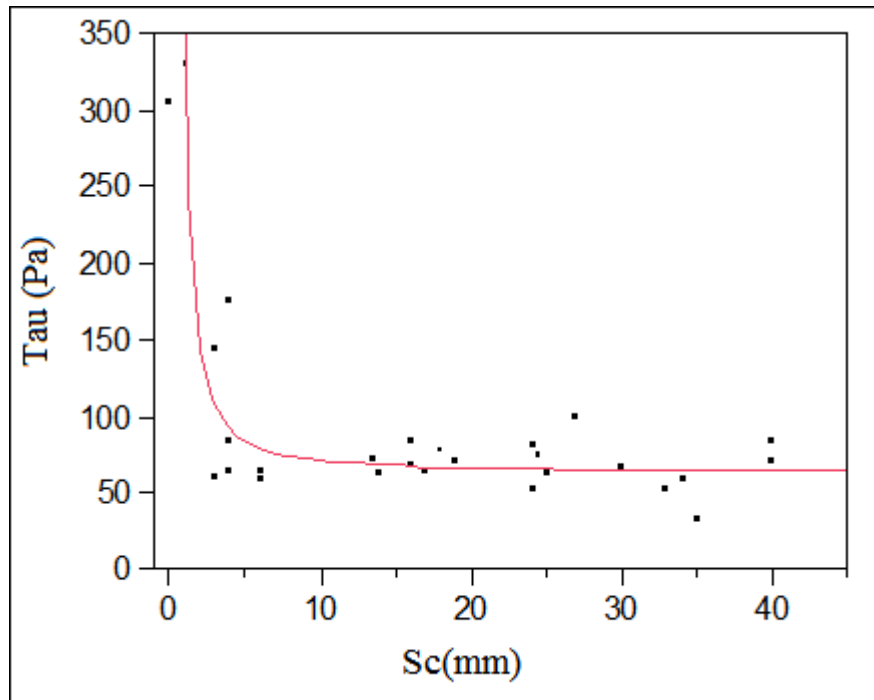


Figure.4. 8.corrélation entre Tau et Sc.

La relation de corrélation est donnée par :

$$\text{Tau} = 62.1 + 68.9 * \frac{1}{\text{Sc}} + 197.7 * \frac{1}{\text{Sc}^2} \quad (4-6)$$

Le résumé d'ajustement de cette corrélation est donnée par le Tableau.4. 6

Tableau.4. 6. Valeurs de l'ajustement Tau et Sc

Paramètres	Valeurs
R ²	0.81
Écart-type résiduel	25.35776
Moyenne de la réponse	82.39256
Observations (ou sommes pondérées)	27

D'après ces résultats on remarque que le Tau à des valeurs élevées et diminue d'une manière rapide pour des valeurs de Sc inférieures à environ 8mm. Pour des valeurs supérieures à 8mm, on constate que le Tau se stabilise à une valeur faible (environ 60Pa) indiquant une bonne fluidité, mais avec un risque de ségrégation.

b) Corrélation entre Vp et Pi

La Figure.4. 9 représente les résultats de corrélation entre la viscosité plastique et la stabilité au tamis.

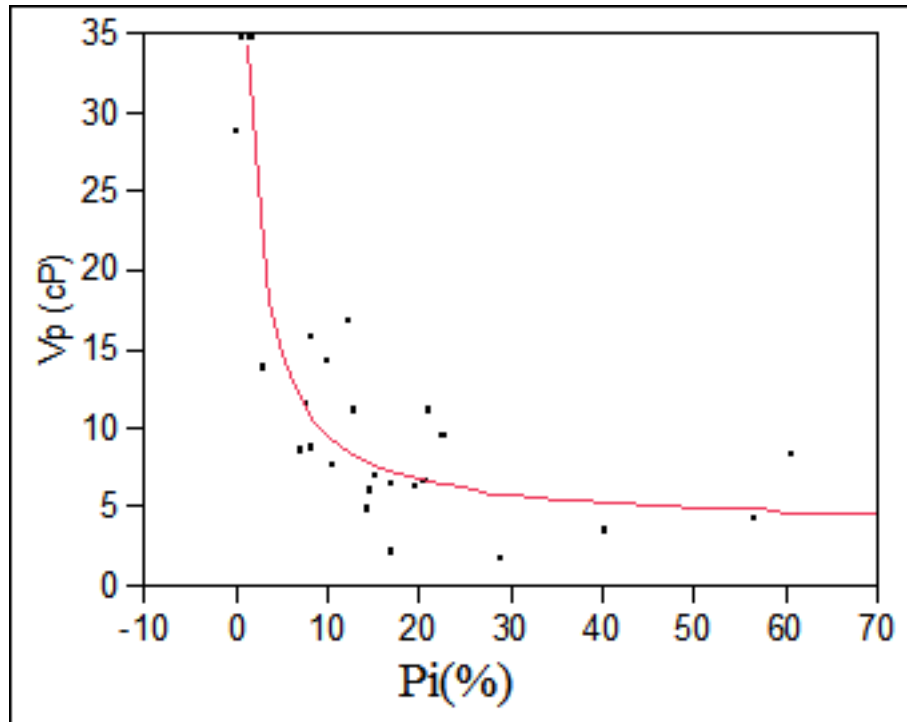


Figure.4. 9. Corrélation entre Vp et Pi .

La relation de corrélation est donnée par :

$$V_p = 3.8 + 60.8 \cdot \frac{1}{P_i} - 28.5 \cdot \frac{1}{P_i^2} \quad (4-7)$$

Le résumé d'ajustement de cette corrélation est donné par le Tableau.4. 7 suivant.

Tableau.4. 7. Valeurs de l'ajustement Vp et Pi.

Paramètres	Valeurs
R ²	0.81
Écart-type résiduel	3.899363
Moyenne de la réponse	10.44058
Observations (ou sommes pondérées)	24

D'après ces résultats on remarque que les valeurs de Vp diminuent pour des valeurs de Pi inférieures à 15%, puis elles diminuent légèrement en fonction de l'augmentation de la laitance (augmentation de Pi).

Conclusion Générale

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet des paramètres de formulation sur la stabilité des bétons frais, notamment des bétons autoplaçants (BAP) et d'établir d'éventuelles relations entre les essais technologiques de mesure de la ségrégation (tel que l'essai au tamis, à la colonne et au cylindre) et les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique).

Pour la réalisation de ce travail expérimental, nous avons utilisé les plans d'expériences, qui permettent de tirer le maximum d'information en faisant moins d'essais, par rapport aux études paramétriques classiques et de donner des modèles statistiques reliant les différentes propriétés étudiées aux facteurs de l'étude.

Les outils statistiques offerts par l'application de cette méthode permettent d'analyser les résultats trouvés, d'établir des modèles mathématiques, de donner les interactions possibles sur les réponses et d'offrir aussi une représentation graphique très claire de la variation des réponses.

Les résultats trouvés à l'issue de cette étude expérimentale montrent, en première étape :

- Une amélioration de la fluidité des BAP (Etalement et temps d'écoulement) lorsque le rapport G1/G2 augmente.
- Une diminution de risque de ségrégation (stabilité au tamis, au cylindre et à la colonne) lorsque le rapport G1/G2 et G/S augmentent.
- L'amélioration de la viscosité lorsque le rapport G1/G2 augmente.
- Le seuil de cisaillement augment lorsque le rapport G1/G2 augment.

Dans une deuxième étape, de bonnes corrélations ont été établis entre les paramètres issus de la caractérisation rhéologique des BAP à l'état frais (selon le modèle de Bingham). Nous avons trouvé une bonne corrélation entre le seuil de cisaillement et stabilité au cylindre (S_c), avec un coefficient de corrélation $R^2=0.81$, d'une façon que l'augmentation des valeurs de la stabilité S_c entraîne une diminution du taux de cisaillement.

Le même résultat est trouvé dans le cas de la corrélation entre la viscosité et la stabilité au tamis (P_i), avec un coefficient de corrélation $R^2=0.81$, d'une façon que l'augmentation des valeurs de la stabilité P_i entraîne une diminution de la viscosité plastique.

Recommandations

Dans ce travail, nous avons essayé de trouver des éventuelles corrélations entre les paramètres rhéologiques et les résultats des essais technologiques de la stabilité. Nous avons utilisé le modèle de Bingham pour calculer les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique). Nous recommandons d'utiliser d'autres modèles tel que (Herschel-Bulkley, Casson, Khayat et al., De Kee,..etc).

Annexe

A.1. Etapes d'analyse avec le logiciel JMP

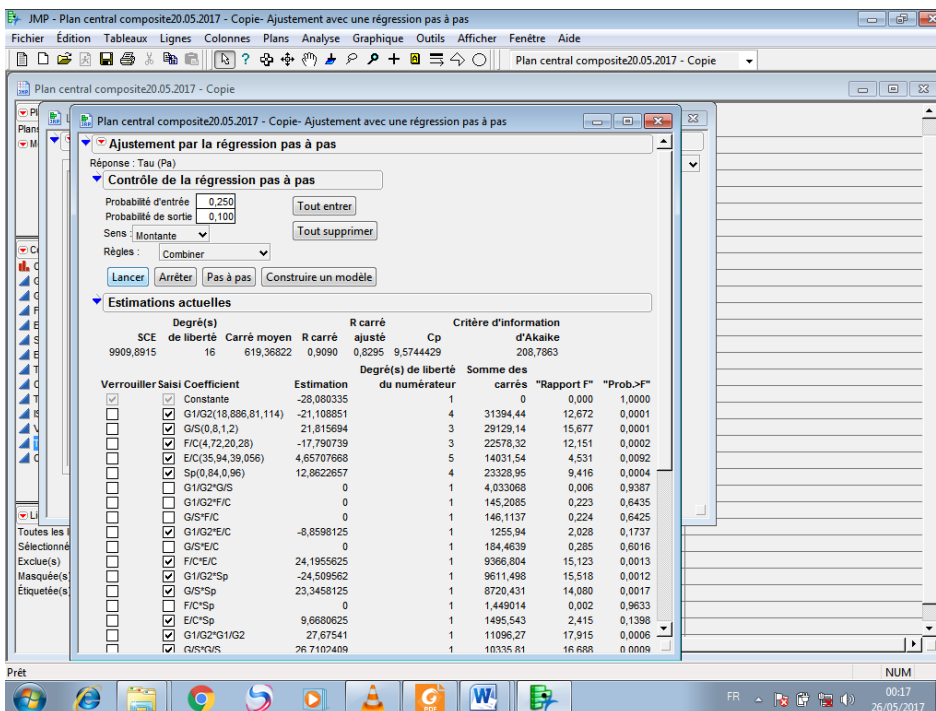
➤ Analyse des résultats

The screenshot shows the JMP software interface. The 'Analyse' menu is open, highlighting the 'Linéaire' option. The main window displays a data table with the following columns: '0 (sec)', 'Cylind', 'Vp (cP)', 'Tau (Pa)', and 'Colonne 14'. The data table contains 31 rows of data. The 'Analyse' menu is open, showing options like 'Modélisation', 'Méthodes multivariées', and 'Survie et fiabilité'.

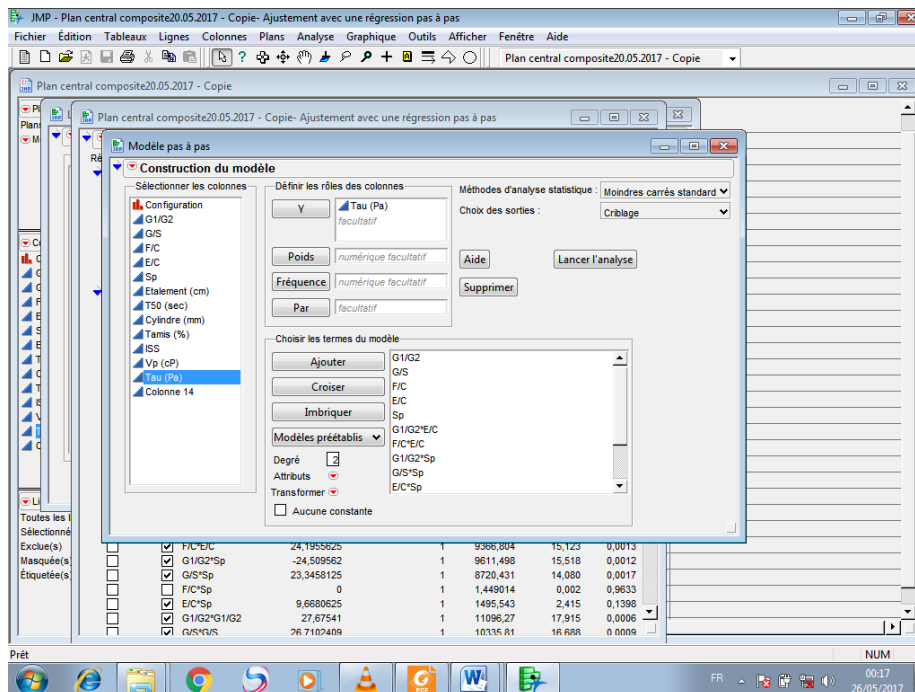
➤ Construction des modèles

The screenshot shows the 'Linéaire' dialog box in JMP. The 'Construction du modèle' section is active. The 'Définir les rôles des colonnes' section shows 'Tau (Pa)' selected as the response variable. The 'Méthodes d'analyse statistique' dropdown is open, showing options like 'Moindres carrés standard', 'Pas à pas', 'Manova', 'Variance log-linéaire', 'Logistique nominale', 'Logistique ordinale', 'Risque proportionnel', 'Survie paramétrique', and 'Modèle linéaire généralisé'. The 'Choisir les termes du modèle' section shows a list of terms including 'G1/G2 & RS', 'G/S & RS', 'F/C & RS', 'E/C & RS', 'Sp & RS', 'G1/G2*G/S', 'G1/G2*F/C', 'G/S*F/C', 'G1/G2*E/C', and 'G/S*E/C'. The 'Degré' is set to 2. The 'Aucune constante' checkbox is unchecked.

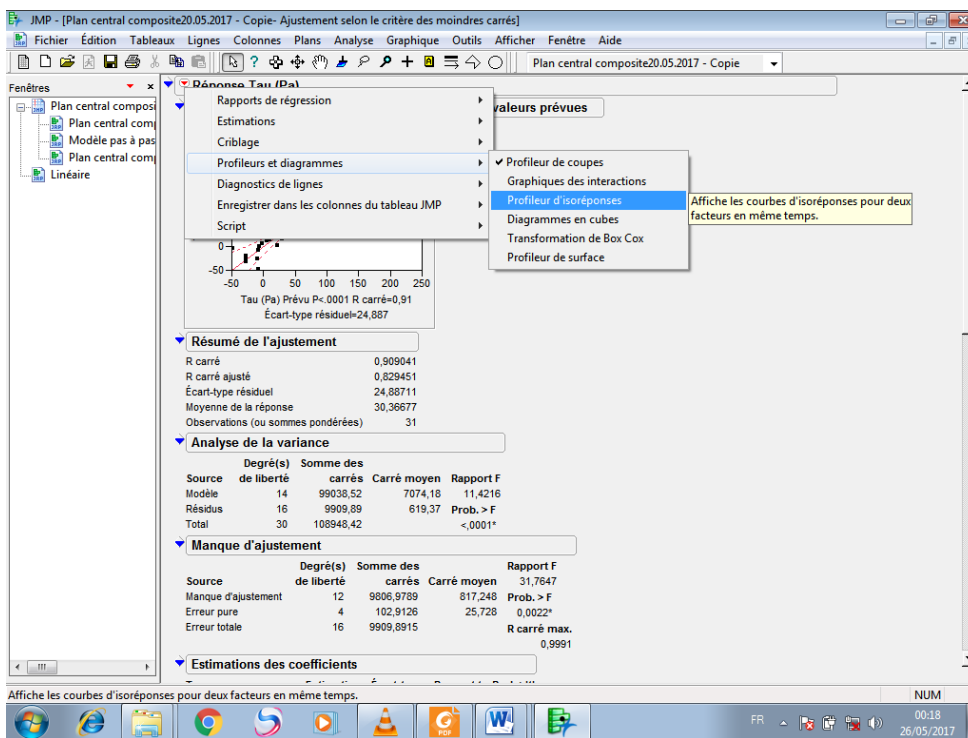
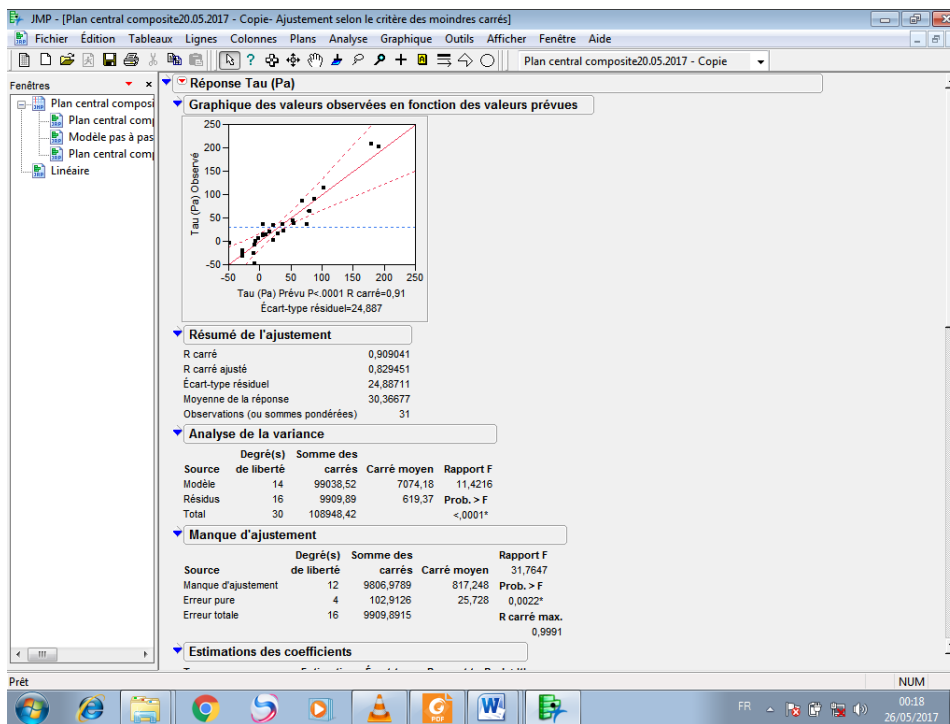
➤ Ajustement par la régression pas à pas



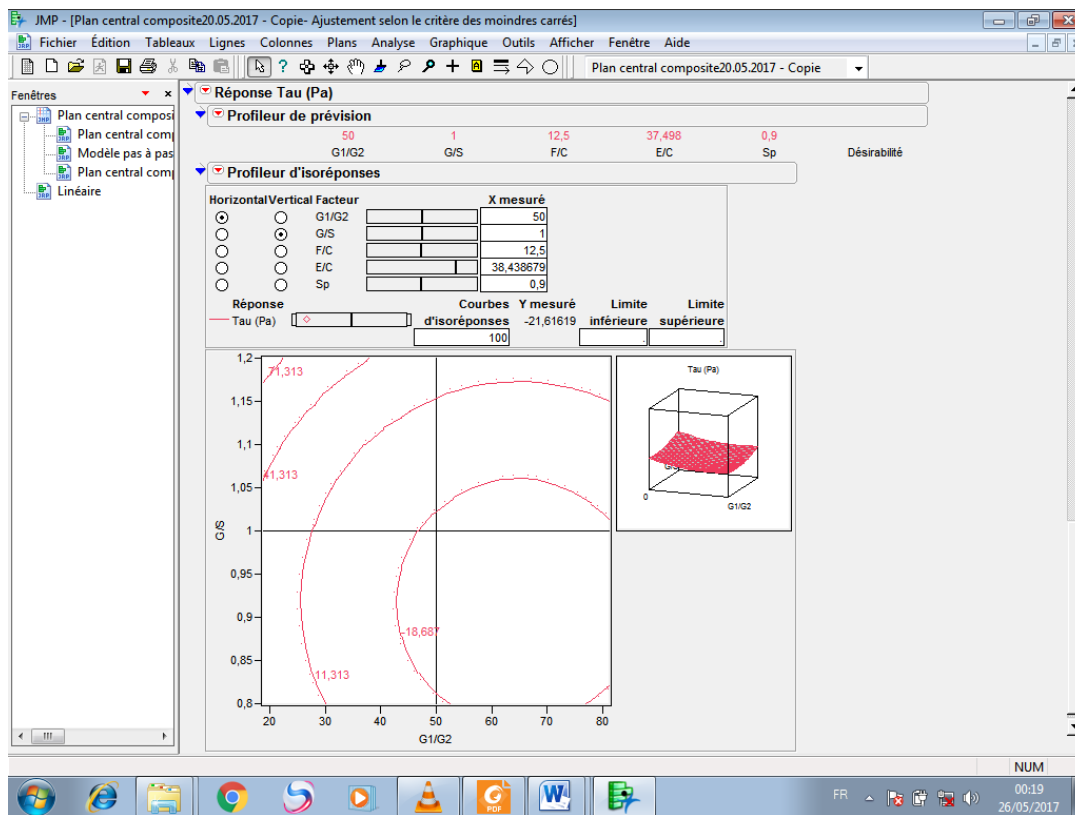
➤ Modèle pas à pas



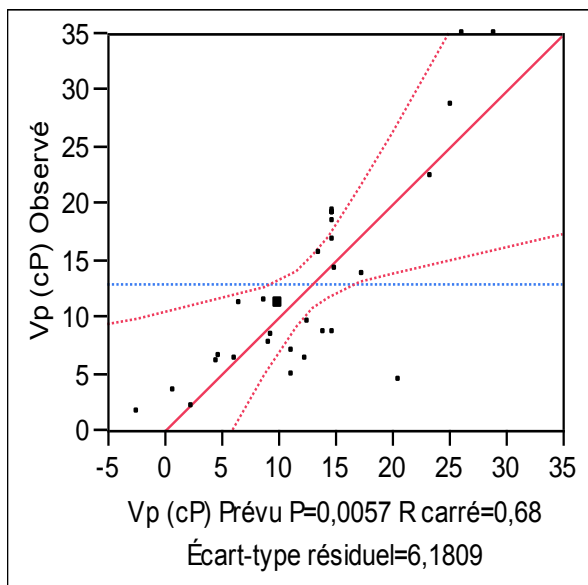
➤ Exemple de résultats (réponse tau)



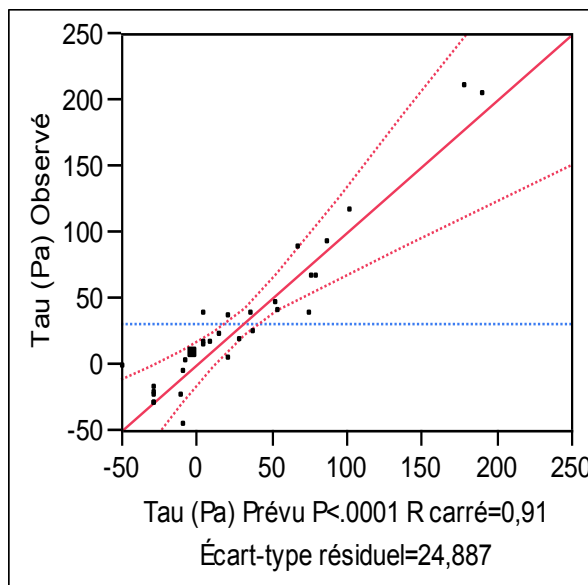
➤ **Professeurs d'isoreponses**



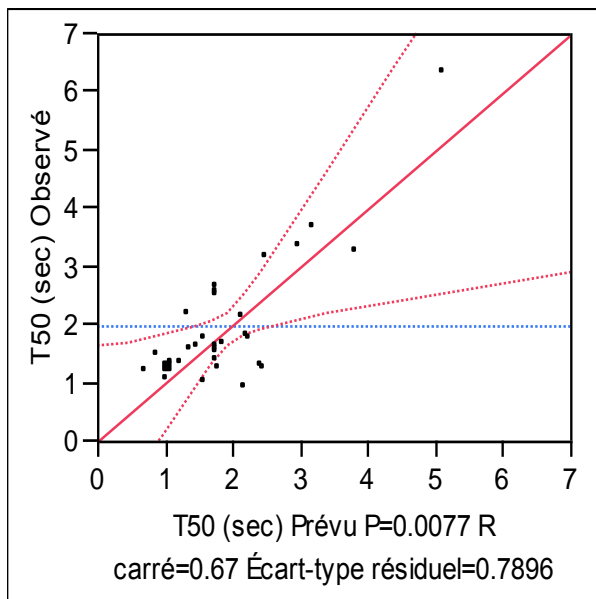
A.2. Graphiques des réponses (Valeurs prévues en fonction de celles Observées)



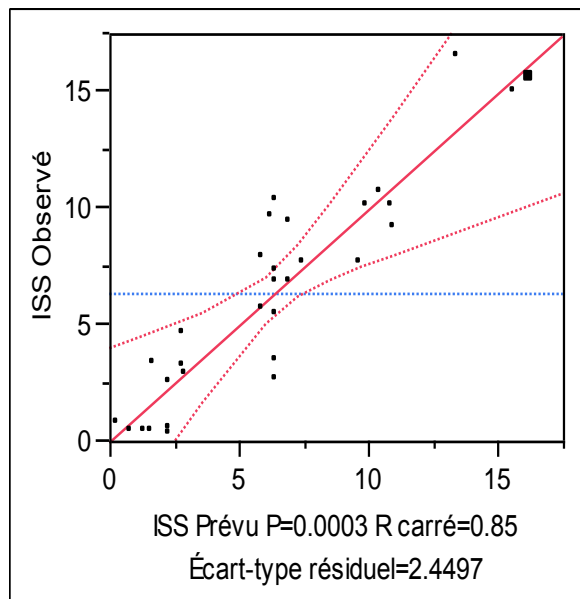
(a) Réponse Vp



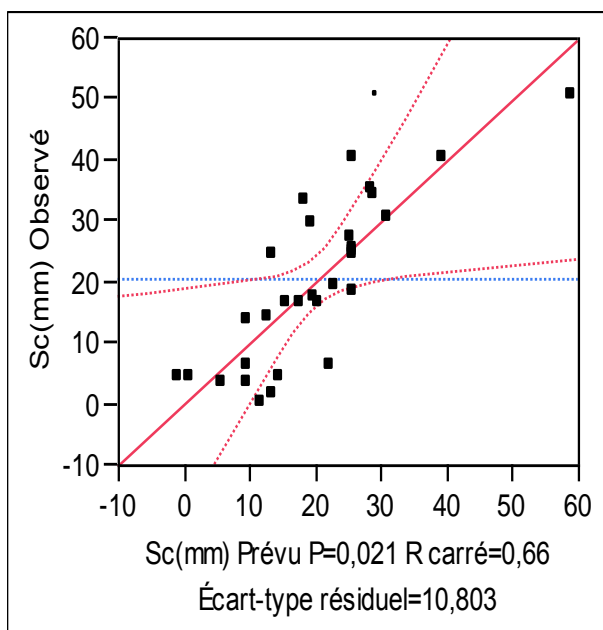
(b) Réponse Tau



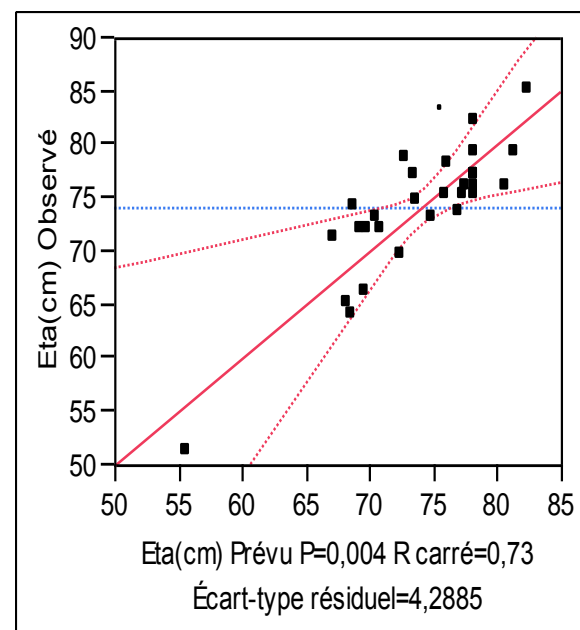
(c) Réponse T50



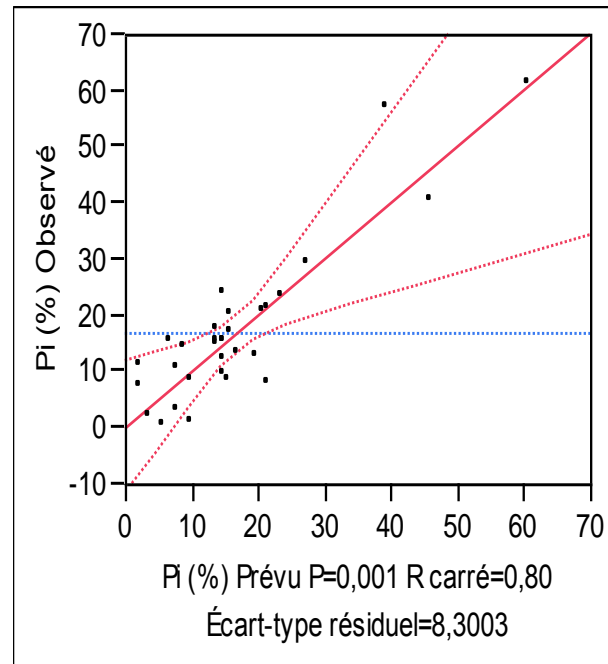
(d) Réponse ISS



(e) Réponse Sc



(f) Réponse Eta



(g) Réponse P_i

A.3. Photos de quelques essais

➤ Etallement



➤ **Rhéomètre**



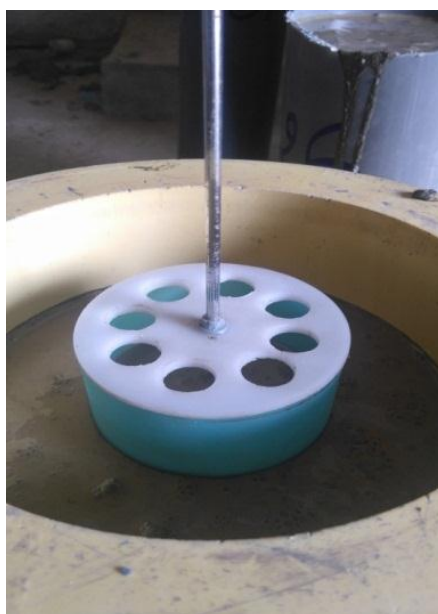
➤ **Stabilité au tamis**



➤ **Stabilité à la colonne**




➤ **Stabilité au cylindre**



A.4. Formulation de la composition du centre (Feuille Excel)

paramètres		
coefficient d'absorption du sable (%)	1,39	
coefficient d'absorption du 3-8 (%)	4,1	
coefficient d'absorption du 8-15 (%)	0,7	
extrait sec du Sp (%)	30	
ρ absolu sable	2,6	
ρ absolu gravier	2,56	
ρ absolu Sp	1,07	
ρ absolu ciment	3,1	
ρ absolu Pm	2,7	
dosage sp (%)	0,9	
E/C	0,375	
F/C	0,125	
Volume de l'air	1	
Volume de pâte (L/m ³) =	338	
paramètres	Volume en (L/m ³)	Dosage pour 1 litre (g)
Sable	367,8	974,6
Gravier 3-8	147,1	376,6
Gravier 8-15	147,1	376,6
Ciment	136,5	420,3
Poudre de marbre	19,5	52,5
Eau	177,3	194,0
Sp	3,5	3,8
Air	1,2	
Volume de pâte	338,0	
V total	1000,0	
ρ béton		2398,5

A.5. Fiche technique du ciment



شركة ذات أسهم البسكريّة للإسمنت

S.P.A BISKRIA CIMENT

ش.ذ.أ. - رأس مالها الاجتماعي : 870.000.000 DA
 Société par actions au capital social de : 870.000.000 DA
 N° Identification Fiscale : 000907024283698 - N° Article d'Imposition : 07030013436 - N° Registre de Commerce : 07/00-0242836 B 09

FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5 CRS Mise à jour du 09 Janvier 2017

Caractéristiques chimiques			
Eléments	Garanties	Teneur %	
SO ₃	(NA 237) < 3.5%	2.30	
Cl	(NA 5080) ≤ 0.1%	0.028	
P.A.F	(NA 237) ≤ 5 %	2.04	
C3S Clinker	Calculé Selon Bogue	62	
C2S Clinker	Calculé Selon Bogue	13	
C3A Clinker	Calculé Selon Bogue	1.5	
C4AF Clinker	Calculé Selon Bogue	17	
Caractéristiques physiques			
Désignation	Unité	Garanties	mesures
Surface spécifique Blaine	Cm ² /g	(NA 231)	3420
Début de prise	min	(NA 233) ≥ 60 min	180
Expansion à chaud	mm	≤ 10mm (NA 232)	0.5
Consistance	%	T (NA 229)	25.7
Caractéristiques mécaniques			
Résistance à la compression MPa	02 jours	≥ 10	21
	28 jours	62.5 ≥ R ≥ 42.5	49.5

SPA BISKRIA CIMENT Siège sociale : DJAR BELAHRACHE BRANIS WILAYA DE BISKRA (Algérie)

☎ : +213 (0) 33 62 74 62 Fax: +213 (0) 33 62 73 92 MOBILE ☎ : +213 (0) 560 960 470 Email ✉ : biskria.spa@gmail.com

A.6. Fiche technique du superplastifiant

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

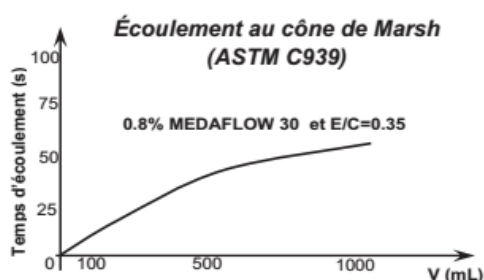
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Références bibliographiques

- Abdelouahed A., Belachia M., Sebbagh T., (2011). « Étude de comportement des nouveaux bétons (béton autoplaçant) sous des conditions extrêmes » 1er Séminaire National de Génie Civil sur les Matériaux et Protection de l'Environnement, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie.
- Adjoudj M. (2015). « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton ». Thèse de Doctorat, université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie. 161p.
- AFGC, (2008). « Recommandations pour l'emploi des des bétons autoplaçants », PN, B@P, Documents scientifiques et techniques, Association Française de Génie Civil, 64p.
- Aiad I., (2003) « Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes » *Cement and concrete research*, 33(8):1229–1234.
- Ambroise J., Rols S., Péra J.,(1999). « Self-leveling concrete–Design and properties », *Concrete Science and Engineering*, 1(3):140-147.
- Asakura E., Yoshida H., Nakae H., (1992). « Influence of superplasticizer on fluidity of fresh cement paste with different clinker phase composition », *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements*, New Delhi IV, India, pp.570- 576.
- Beaupré D., Mindess S., (1998). « Rheology of Fresh Concrete: Principles, Measurements, and Applications », *Materials Science of Concrete V*, Ed. by J. Skalny and S. Mindess, Acers, 149-190.
- Beaupré, D. (1994). « Rheology of high-performance shotcrete », Thèse de Doctorat, University de British Columbia, Canada.
- Belaidi A.S.E., (2013). « Contribution à l'étude rhéologique et durabilité de béton autoplaçant : apport des ajouts cimentaires ternaires et des fillers locaux et industriels ». Thèse de Doctorat, Université Saad Dahleb de Blida, Blida, 192p.
- Beris, A. N., Tsamopoulos, J. A., Amstrong, R. C., and Brown, R. A. (1985). « Creeping Motion of a sphere through a Bingham plastic», *Journal of Fluid Mechanics*, 158:219-244.
- Bjömström, J. et Chandra S., (2003). « Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements », *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, 36(10):685-692.
- Blaine, J. (1943). U.S.Patent No.2, 316, 309.Washington, DC: U.S.Patent and Trademark Office

- Bouhamou N., Belas N., Mesbah H., Mebrouki A., Yahia A., (2008). « Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais », *Afrique Science*, 4 :1-20p.
- Boukendakdji, O, (2010). «Étude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires », Thèse de doctorat de l'Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 198p.
- Boukhalkhal. A, (2012) « rhéologie, caractéristique physico-mécanique et durabilité des bétons autoplaçants à base de poudre de marbre », université Ammar Telidji Laghouat, Laghouat.
- Bouziani, T. Benmounah, A., Bederina, M., and Lamara, M., (2011). « Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand-concrete », *The Open Construction and Building Technology Journal*, 5:25-29.
- Bouziani, T., Benmounah, A., & Bédérina, M. (2012). « Statistical modelling for effect of mix-parameters on properties of high-flowing sand-concrete ». *Journal of Central South University*, 19(10), 2966-2975.
- Bouziani, T., Benmounah, A., & Bédérina, M. (2012). « Statistical modelling for effect of mix-parameters on properties of high-flowing sand-concrete ». *Journal of Central South University*, 19(10), 2966-2975.
- Brower, L.E. and Ferraris, C.F.(2003). « Comparison of concrete rheometers », *Concrete International 'Detroit'*, 25(8):41-47.
- Charbel, A.(2008) « effet couplé de la formulation et du murissement sur les caractéristique béton autoplaçants a haute performance dans les conditions estivales ».
- Courazé G., Grossiord JL. (1983). « Initiation à la rhéologie », *Technique de documentation Lavoisier*, Paris, 300p.
- Coussot, P, (1992). « Rhéologie des boues et laves torrentielles- Etude de dispersions et suspensions concentrées ». Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 416p.
- Coussot, P. et Grossiard, J. (2002). « Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton », *EDP Science*, 221p.
- Da Cruz, F. (2004). « Écoulement de grains sec. Frottement et blocage », Thèse de doctorat école notionnel des ponts et chaussés, France.

- De Larrard, F. et Le Roy, R. (1992) « relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à haut performance », *matériaux et construction* (25) :464-475pp.
- De Larrard, F. (2002). « Construire en béton. L'essentiel sur les matériaux », Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- De Larrard, F. « Structures granulaires et formulations des bétons », *Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, OA34, Paris.
- Domone P. L. J., Yongmo, X., and Banfill P. F.G. (1999). « Developments of the Two-Point Workability Test for High-Performance Concrete », *Magazine of Concrete Research*, 51(3):171-179.
- Domone P. L., and Jin, J. (1999). « Properties of mortar for self-compacting concrete ». In *proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete*: 109-120. Stockholm, Sweden.
- El Chabib H., Moncef N., (2006). « Effect of Mixture Design Parameters on Segregation of Self-Consolidating Concrete », *ACI Materials Journal*/September/October.
- Ferraris, C.F. (1999). « Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete », *State of the Art Report*, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104(5):461-78.
- Fujiwara, H. (1992). « Fundamental study on the self-compacting property of high-fluidity concrete ». *Proceeding of the Japan Concrete Institute*, 14(1):27-32pp.
- Girish, S., Ranganath, R.V., and Vengala, J. (2010). « Influence of powder and paste on flow properties of SCC », *Construction and Building Materials*, 24: 2481–2488.
- Golaszewski J.G., Szwabowski J., (2004). « Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars », *Cement and concrete research*, 34(2):235-248.
- Goupy, J., & Creighton, L. (2006). *Introduction aux plans d'expériences-3^{ème} édition-Livre+CD-Rom*. Dunod.
- Griesser A., (2002). « Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures: Rheology, phase composition, pore water and heat of hydration of cementitious systems », *Thèse de doctorat de l'Institut de Technologie Fédéral, Suisse*, 147p.
- Harrat, M. (2007). *Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site: unité Maghreb céramique de Touggourt. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah de Ouargla*, pp. 92.

- He, Y.B. Laskowski, J.S. Klein, B. (2001). « Particle movement in non-Newtonian slurries : the effect of yield stress on dense separation », *Chemical Engineering Science*, 56(9):2991-2998.
- Hu, C. (1995). « Rhéologie des bétons fluides », these de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, Paris, 205p.
- JMP, (2007). « JMP Statistical Software », Statistical American Society, SAS, available at: www.jmp.com.
- Jossic L. et Magnin A. (2001), « Trainée et stabilité d'objet en fluide à seuil », *Les Cahiers de Rhéologie*, 18(1) : 55-64.
- Khayat, K. H., Ghezal, A., & Hadriche, M. S. (2000). « Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete ». *Materials and Structures*, 33(5): 338-344.
- Khayat, K.H., Hu, C., and Monty, H, (1999). « Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications », in: the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, karendahl A, Petersson O, editors, RILEM Publications S.A.R.L., France,; 143–152.
- Koehler, E.P., and Fowler, D. W. (2004). « Development of a portable rheometer for fresh Portland cement concrete », Research report ICAR 105-3F, International Center for Aggregate Research, Washington, USA.
- Legrand C. (1982). « The structure of suspensions of cement and the behaviour of suspensions of cement ». *Le béton hydraulique*, presses de l'ENPC , Paris.
- Mekhatria A. (2001), « Stabilité et sédimentation de sphères dans un fluide à seuil », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 220 p.
- Okamura, H., and Ozawa, K, (1995). « Mix-design for self-compacting concrete », *Concrete Library of JSCE*; 25: 107-20.
- Otsuki, N. Hisada, M., Nagataki, S. and Kamada, T. (1996). « An experimental study on the fluidity of antiwashout underwater concrete ». *Materials Journal*, 93(1):20-25.
- Pedersen, B., and Smeplass, S. (2003). « The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase », Wallevik and Nielssen (Eds), *Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Island, pp. 106-116.
- Poitou, A., and Racineux G. (2001). « A squeezing experiment showing binder migration in concentrated suspension », *Journal of Rheology*, 45(3): 609-625.

- Powers T.-C., (1935), « Absorption of Water by Portland Cement Paste during the Hardening Process », *Industrial and Engineering Chemistry*, 27(7), pp.790-794.
- RILEM (2001), « Self-Compacting Concrete. State-of-the-art », report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Edited by A. Skarendahl and O. Petersso , RILEM Publications, France.
- Rossi, P. (1998). « Les bétons de fibres métalliques ».Ed Techniques Ingénieur.
- Saak, A. W., Jennings, H. M., and Shah, S. P. (2001-a). « The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste », *Cement and concrete research*, 31(2):205- 212.
- Saak, A. W., Jennings, H. M., and Shah, S. P. (2001-b). « New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete » *Materials Journal*, 98(6), 429-439.
- Sedran, (1999) *Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivellants*, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 220 p.
- Singh, G and Upadhyay, R.K. (1993). Essetiel oils-a potent source of *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 52, , pp. 661-675.
- Sonebi, M. (2001). « Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts ». *Cement and concrete research*, 31(11), 1553-1560.
- Tattersall GH., (1991). « Workability and quality control of concrete », London, E & FNSPON, 262 p.
- Tattersall, G.H. and Bloomer, S.J., (1979). « Further development of the two-point test for workability and extension of its range », *Magazine of Concrete Research*, 31(109):202-210.
- Umehara H., Uehara T., Enomoto Y., Oka S.(1994). « Development and usage of lightweight high performance concrete ». *Proceedings of International Conference on high performance concrete (supplementary papers)*, Singapore. Detroit,USA : ACI ;p. 339-353.
- Utsi S., Emborg M., Carsward J., (2003), « Relation between workability and theological parameters »,3rd International RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publication s.a.r.l, p311-322.
- Van Bui K, Montgomery D G, Hinczak I, Turner K, (1998), « Rapid testing methods for segregation resistance and filling ability of self-compacting concrete *Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium* »,Advances in Concrete Technology', Tokushima, Japon, 85-104pp.

Wallevik, O., and Gjov O. (1990). « Development of a coaxial cylinder viscosimeter for fresh concrete », Proceedings of the Rilem Colloquium on Properties of Fresh Concrete, Edited by: Chapman and Hall, Hanover, Germany, pp213-224.

Yahia, A. & Khayat, K, H, (2001). « Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout ». Cement and Concrete Research, 31(5), 749-757.