

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE AMMAR THLIDJI - LAGHOUAT**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**Département de Génie Civil**

**Mémoire**

**Présenté par**

**SETTALA Khaled**

**En vue de l'obtention du diplôme Master en génie civil**

**Option : Matériaux de construction**

**Titre**

**CONTRIBUTION A LA FORMULATION D'UN BETON  
AUTO-PLAÇANT FIBRE A BASE DES MATERIAUX LOCAUX**

***Soutenu devant le jury :***

Mr. BELAIDI Akram Salah. Eddine.	M.C.A	Président
Mr.BENABED Benchaa	M.C.B	Examineur
Mr .HADJOUJJA Mourad	M.C.B	Encadreur
Mr. BOUZIANI Tayeb	M.C.A	Co-encadreur

**Année d'étude: 2014/ 2015**

## Remerciements

*Au premier lieu, je tiens à remercier Dieu qui nous a donné le courage et la volonté pour terminer ce travail.*

*Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de génie civil à l'Université AMMAR THLIDJI de Laghouat.*

*Je tiens à remercier Dr HADJOUDDJA Mourad qui a dirigé et accompagné ce travail. Ainsi que je remercie particulièrement Dr BOUZIANI Tayeb, de m'avoir encouragé au début pour continuer mes études au master. Je souligne aussi leur grande compétence, ainsi que leur disponibilité.*

*Je tiens également à remercier Dr. BELAIDI Akram Salah Eddine, d'avoir présidé le jury et Dr.BENABED Benchaa, d'avoir examiné notre travail.*

*Nous tenons de remercier aussi tous les personnels du laboratoire de génie civil notamment pour leur aide et orientations précieuses.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères envers les enseignants de département de génie civil qui ont contribué dans notre formation.*

*Sans oublier nos amis de la promotion 2014 et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

## **Dédicace**

**Je rends grâce à ALLAH LE TOUT PUJSSANT pour tous les bienfaits dont il m'a comblé Ce mémoire ayant été rédigé, je le dédie:**

**À mes chers parents, à ma famille et à mes frères et sœurs**

**À mes encadreurs et qui, m'ont accompagné dans la réalisation de ce travail.**

**À tous mes amis du CTC et toutes les personnes qui m'ont soutenu durant mon parcours universitaire, et la 01<sup>ère</sup> promotion option M.D.C université de Laghouat.**

## ملخص

هذ العمل التجريبي يمثل دراسة عن تأثير عناصر الخلط ( نسبة الماء/الاسمنت E/C , نسبة الحصى/الرمل G/S, كمية SP وكمية المسحوق الكلسي FC) على الخصائص الخرسانة الرملية ذاتية التوضع المدعمة بالألياف المعدنية المموجة (BSAPF) في حالتها الرطبة والصلبة.

نتائج الاختبارات التجريبية التي تم تنفيذها على (BSAPF) تبين أن إدماج 43.17 كغ/م<sup>3</sup> من الألياف المعدنية المموجة تحسن بنسبة كبيرة في قوة الانحناء و الضغط.

BSAPF يتكون نسبيا من خليط من 20% من رمل الكثبان مع 80% من الرمل الغريني ومع نسبة (G/S) بين 0,7-0 , ألياف معدنية مموج بنسب تتراوح ما بين 0-43 كغ/م<sup>3</sup> ومسحوق كلسي يتراوح ما بين 144-256 كغ/م<sup>3</sup> التي تم تقييمها.

النماذج الإحصائية المقدمة باستخدام تصميم المركزي تشير إلى أن نسبة الحصى على نسبة الحصى/الرمل (G/S), نسبة الماء/الاسمنت (E/C) وكمية (SP) لديهم أكبر تأثير على قابلية وقوة الضغط وقوة الإنحناء, وأثار التفاعل بين (G/S) وحجم الألياف (Vf) وبين (G/S) والمسحوق الكلسي (FC) والتفاعل بين (Vf) و (FC) يسمح لنا بي الحصول على عدة منحنيات متعددة الإجابات, الخاصة بالخرسانة الرملية الليفية ذاتية التوضع (BSAPF).

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة ذاتية التوضع, رمل الكثبان, تصميم المركزي, خصائص ميكانيكية, التحسين, الألياف المعدنية المموجة, الخرسانة المدعمة بالألياف, المسحوق الكلسي, العوامل, إجابات.

## Résumé

Ce travail expérimental présente une étude sur les effets des paramètres de formulation (rapport E/C, rapport G/S, les fibres métallique type ondulée, dosage de SP et le dosage de FC) sur les propriétés des bétons de sable auto-plaçant fibré (BSAPF) aux états frais et durci.

Les résultats d'essai expérimentaux qui ont été réalisés montrent que l'incorporation de 43.17 kg/m<sup>3</sup> de fibre métallique ondulée sur le BSAPF a pour conséquence une amélioration significative de la résistance à la flexion et la compression.

Le BSAPF proportionnés avec un mélange de 20% de sable dunaire et 80% de sable alluvionnaire, rapport G/S prise entre 0 à 0.7, fibres métalliques ondulées 0-43 kg/m<sup>3</sup> et filler calcaire 144 à 256Kg/m<sup>3</sup> ont été évalué.

Les modèles statistiques développés par utilisation un plan composite central qui établis indiquent le rapport G/S, le rapport E/C et le dosage de SP aux les plus grands effets sur l'ouvrabilité et la résistance à la compression et à la flexion, et les effets de l'interaction entre le rapport G/S et le volume de fibre (Vf), entre G/S et filler calcaire (FC) et l'interaction entre Vf, et FC et permettre d'obtenir plusieurs courbes iso réponses du BSAPF

**Mots clés :** Béton auto-plaçant, sable de dune, conception factorielle, propriétés mécaniques, optimisation, fibre métallique ondulée, Béton renforcé de fibres, filler calcaire, facteurs, réponses.

# Sommaire

Remerciements.....	2
ملخص.....	4
Résumé.....	5
Sommaire.....	6
Liste de figures.....	10
Liste de tableaux.....	13
Abréviations (NOTATIONS).....	14
Introduction générale.....	16

## Chapitre1

### Béton de sable auto-plaçant renforcés par des fibres métalliques(BSAPF)

Introduction.....	19
1 Bétons auto-plaçant.....	19
2 Historique du BAP.....	20
2.1 Sur la mise en œuvre.....	21
2.2 Sur la qualité du béton.....	21
3 Les différents constituants d'un BAP.....	22
3.1 Gravillons.....	22
3.2 Superplastifiants.....	22
3.3 Additions des fines.....	24
3.4 Addition des fibres métalliques.....	25
3.4.1 Rôles des fibres dans le béton.....	25
3.4.2 Influence du dosage de fibres.....	26
4 Formulation du béton de fibres métalliques.....	27
4.1 Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par SERNA.ROS.....	28
4.2 Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par P. ROSSI.....	29
5 Propriétés des BAP à l'état frais.....	29
5.1 Critères d'autonivelance.....	30
5.2 Capacité de remplissage.....	30
5.2.1 Etalement [NF EN 12350-8].....	30
5.3 Capacité de passage.....	31
5.3.1 Essai à l'anneau [NF EN 12350-12].....	31
5.3.2 Boite en L [NF EN 12350-10].....	32

5.4	Maintien de la stabilité.....	32
5.4.1	<i>Essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]</i> .....	32
5.5	Séquence d'essai .....	35
6	Propriétés des BAP à l'état durci.....	35
6.1	Résistances mécaniques.....	35
6.2	Retrait .....	37
6.2.1	<i>Retrait de dessiccation</i> .....	37
6.2.2	<i>Retrait (état frais)</i> .....	37
7	Méthodes de formulation des BAP.....	38
7.1	Méthode basée sur l'optimisation de mortier.....	39
7.2	Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte.....	40
7.3	Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire.....	41

## Chapitre 2

### Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales

Introduction.....	43
1 Granulats.....	43
1.1 Gravier.....	43
1.1.1 <i>Analyse granulométrique</i> .....	43
1.1.2 <i>Teneur en eau</i> .....	44
1.1.3 <i>Coefficient d'absorption</i> .....	44
1.1.4 <i>Masse volumique apparente</i> .....	45
1.1.5 <i>Masse volumique spécifique</i> .....	45
1.1.6 <i>Porosité</i> .....	45
1.2 Sable.....	46
1.2.1 <i>Masses volumiques</i> .....	46
1.2.2 <i>Analyse chimique</i> .....	46
1.2.3 <i>Observation à grande échelle des deux sables</i> .....	47
1.2.4 <i>Capacité d'absorption d'eau du sable</i> .....	47
1.2.5 <i>Essai d'équivalent de sable</i> .....	48
1.2.6 <i>Analyse granulométrique</i> .....	49
1.2.7 <i>Module de finesse</i> .....	49
2 Ciment.....	51
3 Caractérisation du Filler calcaire.....	52
3.1 Caractéristiques physico-chimiques.....	53

3.2	Indice d'activité .....	53
4	Superplastifiant .....	54
4.1	Caractéristiques du MEDAFLOW 30 .....	54
5	Fibres métalliques .....	54
5.1	Caractéristiques des fibres .....	54
6	Essais de caractérisations du BSAPF. ....	55
6.1	Introduction.....	55
6.2	Propriétés des BAP à l'état frais .....	55
7	Essais effectués sur le béton BSAPF a l'état frais. ....	56
7.1	Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump).....	56
7.1.1	<i>Observation de la ségrégation.....</i>	57
7.2	Essai d'étalement modifié (J-Ring) .....	58
7.3	Essai de la boîte en L (L-Box).....	59
7.4	Essai de l'entonnoir en forme de V (V-funnel) .....	60
7.5	Essai de la stabilité au tamis .....	61
8	Essais effectués sur le béton BSAPF durci.....	62
8.1	Détermination de la résistance mécanique en compression .....	62
8.2	Essais de flexion (flexion 3 points) .....	63
8.3	Retrait .....	63
9	Méthode de plan d'expérience.....	64
9.1	Plans pour surfaces de réponse .....	64
9.2	Présentation des plans composites.....	65
9.3	Organigramme du plan d'expériences .....	67
	Conclusion .....	68

### **Chapitre 3**

#### **Influence des variations des composant du (BSAPF) sur leur propriétés**

	Introduction.....	69
	But de travail.....	69
1	Préparation des échantillons .....	69
1.1	Formulation.....	69
2	Méthode de plan d'expérience.....	70
3	Méthodes d'essais sur BSAPF.....	72
4	Exploitation des résultats et interprétations .....	74
4.1	Résultats des essais et discussions .....	74

4.2	Traitement des données .....	78
4.3	Modèles mathématiques des réponses .....	79
4.4	Résumé de l'ajustement .....	80
4.5	Estimations des coefficients : .....	81
4.6	Développement des modèles statistiques.....	82
4.7	Analyse de la variance des modèles .....	84
4.8	Analyse des résidus.....	86

## Chapitre 4

### Exploitation de profileurs iso-réponses et de surfaces

1	(V-funnel) .....	88
2	Boite en L .....	91
3	Étalement.....	95
4	Stabilité au tamis.....	96
5	J-Ring Étalement .....	97
6	J-Ring ( $J_{int}$ - $J_{ext}$ ).....	99
7	Masse volumique .....	99
8	Résistance à la compression Rc28 Jours. ....	100
9	Résistance à la flexion Rf28 Jours.....	101
	Conclusions générales et perspectives .....	103
	Bibliographie.....	106
	Annexes.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Liste de figures

### Chapitre 1

Figure 1. 1 : Action du superplastifiant et Déflocculation des grains de ciment.....	23
Figure 1. 2:Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	23
Figure 1. 3 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton	24
Figure 1. 4 : Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques.....	25
Figure 1. 5 : la variation d'affaissement en fonction des fibres de polypropylène et d'acier ..	26
Figure 1. 6 : Variation de la viscosité plastique avec le pourcentage des fibres incorporées .	27
Figure 1. 7 : Abaque de formulation du béton de fibres. ....	28
Figure 1. 8 : Détermination du rapport S/G optimal d'après SERNA ROS .....	29
Figure 1. 9 : Détermination du rapport S/G optimal d'après .....	29
Figure 1. 10 : Mesure de l'étalement .....	30
Figure 1. 11 : Essai d'étalement a l'anneau (J-ring) .....	31
Figure 1. 12 :Essai a la boite en L.....	32
Figure 1. 13 : Essai de stabilité au tamis.....	33
Figure 1. 14 :Effet de la ségrégation sur la résistance à la compression(essai du cylindre)....	33
Figure 1. 16 : Corrélation entre la pénétration au plongeur et la stabilité au tamis .....	34
Figure 1. 15 :Formation d'arches pouvant bloquer l'écoulement du béton .....	34
Figure 1. 17 : Phénomène de ressuage.....	38
Figure 1. 18 : Formation d'arches pouvant bloquer l'écoulement du béton.....	36
Figure 1. 19 Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) Correspondant .....	36
Figure 1. 20:Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP.....	37

## Chapitre 2

Figure 2. 1 : Courbe granulométrique du gravier G3/8.....	44
Figure 2. 2:Analyse chimique des deux sables . .....	46
Figure 2. 3:Observations des grains de sable au MEB .....	47
Figure 2. 4: Essai Equivalant de sable. ....	48
Figure 2. 5 : Analyse granulométrique du sable de dune SD.....	50
Figure 2. 6: Analyse granulométrique du sable alluvionnaire SA. ....	51
Figure 2. 7: Ciments utilisés CEM I 42,5R ES. ....	52
Figure 2. 8:Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires .....	53
Figure 2. 9: Essai d'étalement au cône d'Abrams. ....	56
Figure 2. 10: Quelque mélange qui donnera une BSAPF, présenté dans et hors domaine d'étude.....	57
Figure 2. 11:laitance en périphéries de la galette d'étalement.....	57
Figure 2. 12:Formation des pelotes des fibres. ....	58
Figure 2. 13:Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring).....	58
Figure 2. 14: a) mélange donnera une bonne aptitude au phénomène de blocage.....	59
Figure 2. 15: Appareil et dimensions de la boîte en L (L- BOX). ....	59
Figure 2. 16:Phénomène du blocage en zone confinée.....	60
Figure 2. 17:Essai de l'entonnoir en forme de V. ....	60
Figure 2. 18:Essai de la stabilité au tamis. ....	61
Figure 2. 19:Schématisation du dispositif de compression.....	62
Figure 2. 20:Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3points). ....	63
Figure 2. 21:mesures de retrait.....	64
Figure 2. 22:Plan composite pour l'étude de deux facteurs .....	65

### Chapitre 3

Figure 3. 1 : valeurs des résidus en fonction des réponses prévues. .... 87

### Chapitre 4

Figure 4. 1 : Iso-réponse de V-funnel en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(138.35 et 194.63), Vf(0.25%), G/S(0.37 et 0.7) ..... 88

Figure 4. 2 : Iso-réponse de V-funnel en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(138.35 et 194.63), Vf(0.6%), G/S(0.37 et 0.7) ..... 89

Figure 4. 3 :Profileur de surface en 3D de V-funnel,(E/C) en fonction (Sp) avec les variations de FC, Vf, G/S..... 90

Figure 4. 4 : Iso-réponse de L-Boxe en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(160,260), Vf(0.15%), G/S(0 , 0.7)..... 93

Figure 4. 5 : Iso-réponse de L-Boxe en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(160 ,260), Vf(0.6%), G/S(0 et 0.7)..... 93

Figure 4. 6 : Iso-réponse de L-Boxe en fonction E/C Sp avec variation de FC(160 , 260),Vf(0.6%), G/S(0 et 0.7). .... 94

Figure 4. 7 : Profileur de surface en 3D de L-Boxe, (E/C) en fonction (Sp) avec les variations de FC, Vf, G/S..... 94

Figure 4. 8:Courbes iso-réponses d'étalement de BSAPF ..... 96

Figure 4. 9:Courbes iso-réponses de la stabilité au tamis du BSAPF..... 97

Figure 4. 10: Les courbes des profileurs d'iso-réponses3D, et les surfaces de Stabilité au tamis (%)..... 97

Figure 4. 11:Courbes iso-réponses de la réponse d'Étalement (cm) de J-Ring. .... 98

Figure 4. 12:Courbes iso-réponses de la réponse de J-Ring ( $J_{int}-J_{ext}$ ). .... 99

Figure 4. 13:Courbes iso-réponses de la réponse de la masse volumique ( $Kg/m^3$ ). .... 100

Figure 4. 14:Courbes iso-réponses de la réponse de la résistance à la compression, Rc28 Jours(Mpa). .... 101

Figure 4. 15:Courbes iso-réponses en 3D de la réponse de la résistance mécanique à la compression à 28j..... 101

Figure 4. 16:Courbes iso-réponses de la réponse de la résistance à la flexion,Rf 28 jours. . 102

## Liste de tableaux

### Chapitre 1

Tableau 1. 1:Classes d'aptitude a l'écoulement - étalement a l'anneau .....	31
Tableau 1. 2 : Classes de résistance a la ségrégation - essai de stabilité au tamis .....	33
Tableau 1. 3 : séquençage des essais a l'état frais .....	35
Tableau 1. 4:Cahier des charges d'un BAP .....	42

### Chapitre 2

Tableau 2. 1 : Analyse granulométrique par tamisage de gravier G3/8.....	43
Tableau 2. 2 : Masses volumiques apparentes et spécifiques des sables utilisés.....	46
Tableau 2. 3:Coefficient d'absorption d'eau des sables utilisés. ....	48
Tableau 2. 4: Equivalent de sable utilisé.....	48
Tableau 2. 5: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune SD.....	49
Tableau 2. 6:Analyse granulométrique par tamisage du sable alluvionnaire SA .....	50
Tableau 2. 7: Propriétés chimique et physiques et mécaniques du ciment. ....	52
Tableau 2. 8 :Caractéristiques physiques du filler calcaire utilisé.....	53
Tableau 2. 9:Caractéristiques chimiques du filler calcaire utilisé .....	53
Tableau 2. 10: Propriétés de superplastifiant sur béton durci .....	54
Tableau 2. 11:Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées.....	55
Tableau 2. 12 : Valeur de $\alpha$ en fonction du nombre de points factoriels ( $n_f$ ), en étoile ( $n_\alpha$ ) et centraux ( $n_0$ ) pour le critère de presque-orthogonalité. ....	66

### Chapitre 3

Tableau 3. 1: Proportion des mélanges du JMP.....	71
Tableau 3. 2: Résumé des essais sur BSAPF .....	72
Tableau 3. 3 : les valeurs codées et absolus .....	74
Tableau 3. 4:Proportions et résultats des essais .....	76
Tableau 3. 5:Résumé de l'ajustement.....	80
Tableau 3. 6:Estimation des coefficients des réponses à (À l'état frais).....	81

Tableau 3. 7:Estimation des coefficients des réponses à (À l'état durci). .....	82
Tableau 3. 8:Analyse de la variance des modèles développés (linéaire et quadratiques).....	85

## Chapitre 4

Tableau 4. 1 :Temps d'écoulement avec l'effet de combinaison du dosage FC, Vf, G/S. ....	91
Tableau 4. 2 : Prédiction des valeurs de V-Funnel du (BSAPF). .....	91
Tableau 4. 3 : Prédiction des valeurs de L-Boxe du (BSAPF). .....	92
Tableau 4. 4 : Rapport $H_2/H_1$ et l'effet de combinaison du dosage FC, Vf, G/S. ....	92
Tableau 4. 5 : Valeurs d'étalement et l'effet de l'interaction du dosage FC, G/S en fonction du (E/C,Sp).....	95
Tableau 4. 6 : Valeurs d'étalement et l'effet de l'interaction du dosage FC, G/S en fonction du(E/C et Sp).....	95

### Abréviations (NOTATIONS)

Ab(%)	Coefficient d'absorption
BAP	Béton auto-plaçants
BSAPF	Béton de sable auto-plaçants fibré
BFM	Bétons de fibres métalliques
BO	Béton ordinaire
BS	Béton de sable
G/S	Rapport massique gravier/sable
E/C	Rapport massique eau/ciment
FC	Filler calcaire
Pc	La charge à la rupture en compression
Mv	La masse volumique à l'état frais et durci
PSR	Plan de surface de réponses
PE	Plan d'expériences
Pf	La charge de rupture en flexion
R <sup>2</sup>	Coefficient corrélations
Rc28	Résistance à la compression à 28 jours

Rf28 Résistance à la flexion à 28 jours  
RL Retrait de séchage  
SP Super-plastifiant  
Vf Dosage volumique en fibres

## Introduction générale

Ces dernières années, une nouvelle génération de béton a vu le jour : le béton auto-plaçant (BAP). Ces bétons sont très fluides et se mettent en œuvre sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages complexes et très encombrés, tout en donnant un produit final homogène.

C'est dans ce cadre que ce travail expérimental a été entrepris et dont l'objectif principal est de valoriser les sables des dunes et de proposer une approche, théorique et expérimentale, contribuant à la formulation d'un béton de sable auto-plaçant renforcé par des fibres métalliques de type ondulé (BSAPF). C'est ainsi qu'une nouvelle approche connue sous le nom « plan d'expériences » a été adoptée afin de prédire le comportement de ces bétons à l'état frais et à l'état durci. Les modèles obtenus permettent par la suite, et après validation, de comprendre le rôle joué par les différents constituants et paramètres tels que le volume des fibres, le dosage en fillers calcaires, le rapport gravier/sable et les effets de leurs interactions sur les propriétés pertinentes du BSAPF.

Les modèles développés ne peuvent pas être utilisés pour faire des essais de mise au point d'un béton donné. Par contre, ils peuvent nous donner une première approche, l'obtention d'ordres de grandeur réalistes, ce qui est peut-être le plus important, une meilleure compréhension de la sensibilité des paramètres de composition, et de leur interdépendance. On remarque que le nombre de paramètres considérés à juste titre comme importants dans la formulation des bétons, tels que la nature, la granulométrie ou la forme des granulats, la finesse et la composition chimique des liants ou encore la nature chimique des adjuvants, ne sont pas pris en considération sauf la nature de ciment et le supéropastifiant pour des raisons de compatibilité avec le ciment.

Les bétons sont fabriqués presque exclusivement avec les granulats siliceux alluvionnaires. Malheureusement, ces ressources naturelles s'épuisent aujourd'hui et l'exploitation des dernières réserves crée sur l'environnement un impact négatif de plus en plus lourd à supporter. D'autre part, les sables siliceux (dunaire et alluvionnaire) sont en quantités assez grandes et disponibles. C'est dans cet objectif que les bétons de sable auto-plaçant ont été mis en œuvre.

Le développement du matériau « béton » n'a pas cessé d'avancer, et a conduit ces dernières années, à l'adaptation d'un nouveau type de béton : béton de fibre (BF). Les fibres métalliques ajoutées au béton rendent le matériau plus ductile et plus déformable. Ces fibres permettent la couture des fissures formées dans la matrice fragile du béton et de confiner leur développement, rendant le matériau durci plus apte à se déformer et donc à absorber de l'énergie [1] [2].

Plusieurs travaux ont été menés sur le béton de sable auto-plaçant, de la formulation à la durabilité, afin de permettre la valorisation des sables locaux dans le béton. Ces travaux ont mis en évidence des propriétés spécifiques du béton auto-plaçant qui lui permettent d'apporter une réponse adaptée à des problèmes mal résolus par le béton classique en lui donnant ainsi une place à part entière dans la gamme des bétons [3].

L'étude de la composition d'un béton, revient à définir le mélange optimal des granulats, dosage eau, et dosage de fibre ainsi qu'en adjuvant dont on dispose, dans le but d'obtenir un béton adéquat.

La plupart des approches de formulation ne considèrent pas l'effet spécifique des paramètres du mélange et leurs interactions sur la performance du béton. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème afin de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Les principaux problèmes auxquels on se trouve confronté, sont principalement la méthode de formulation d'une part qui réside en une démarche mathématique conduisant à une formule de composition de béton approximative et unique et d'autre part les données expérimentales mais souvent difficiles à interpréter qui trouvent un grand intérêt chez les chercheurs par les économies qu'elles procurent en réduisant le nombre d'essais nécessaires afin d'aboutir à une formule adéquate de composition de béton

Le but de cette étude à caractère essentiellement expérimental est de quantifier l'apport de ces fibres métalliques dans du béton de sable auto plaçant fabriqué avec des matériaux locaux. Les propriétés à l'état frais mais aussi à l'état durci sont présentées. Nous essayerons d'étudier les mécanismes et les paramètres pertinents des propriétés physiques et mécaniques.

L'utilisation d'une approche de modélisation statistique et l'identification de la signification de l'influence des paramètres primaires et leurs interactions sur les propriétés pertinentes du BSAPF constituent un premier objectif de cette étude. Ces modèles permettront d'évaluer le comportement du BSAPF afin de réduire et de simplifier le protocole d'essais nécessaires au laboratoire pour optimiser un mélange.

A travers notre travail, en vise d'améliorer le comportement du matériau vis à vis de la traction, ainsi que sa ductilité et son comportement après fissuration. Pour atteindre cet objectif, la présente étude permet de mettre en évidence les aspects positifs de l'ajout de fibres métalliques et fillers calcaires au béton sous sollicitations.

Cette caractérisation permettra de contribuer à l'amélioration des connaissances sur les propriétés physico - mécaniques de ces matériaux, on tentera d'évaluer la possibilité d'utilisation des matériaux locaux afin de fabriquer des bétons de structure de résistance et de durabilité acceptables. Finalement, toutes ces données permettront de faire des recommandations sur la fabrication structurelle de bétons de sable auto plaçant fibré.

L'objectif principal de ce travail est de comprendre les effets des paramètres de formulation : le rapport E/C, dosage du SP, dosage du FC et fibre métallique et le rapport G/S sur les propriétés aux états frais et durci des BSAPF. Afin d'éviter toute une étude paramétrique classique, nous avons utilisé un plan d'expérience, basée sur une approche statistique, pour voir l'effet de chaque paramètre et les effets de leurs interactions sur les propriétés des BSAPF.

Notre présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

-Le premier chapitre résume une étude bibliographique sur les BAP, leurs propriétés aux états frais et durci, les méthodes de caractérisations et les différentes méthodes de formulation.

-Le deuxième chapitre résume une caractérisation des matériaux utilisés : gravier 3/8, sable alluvionnaire et dunaire, ciment, fillers calcaires et superplastifiant, fibres métalliques, et présentation sur la méthode de plan d'expérience.

- Les derniers chapitres regroupent les différents résultats trouvés à l'issue de notre étude. Dans ce chapitre, on commence par donner le but de notre travail, ensuite on exploite les résultats par l'établissement des modèles mathématiques et l'exploitation des courbes en 2D et 3D avec leurs interprétations.

## **Chapitre1**

### **Béton de sable auto-plaçant renforcés par des fibres métalliques(BSAPF)**

#### **Introduction**

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques d'après une variété de documentations concernant les bétons auto-plaçant, les bétons renforcés par des fibres et plus particulièrement les bétons auto-plaçant renforcés par des fibres à base de sable de dune. Il expose d'abord l'historique du béton auto-plaçant, qui représente le constituant de base pour notre matrice ainsi que le béton de fibres, suivit par les caractéristiques géométriques et mécaniques des principales fibres susceptibles d'être employées comme matériaux de renfort dans des matrices cimentaires. Ce chapitre présente aussi le rôle des fibres dans le béton et leurs domaines d'applications, suivis par une étude bibliographique sur les performances de déformabilités et la stabilité.

#### **1 Bétons auto-plaçant**

Le concept du BAP, est le fruit d'un besoin d'économie et de qualité accrue pour les constructions en béton armé. L'idée du professeur Okamura de l'université de Tokyo est donc de concevoir une formulation de béton capable de se mettre en place par le seul fait de la gravité sans l'apport de vibration interne ou externe.

L'intérêt pour les BAP en Europe n'est apparu que récemment. Ceci est dû à deux raisons, les études concernant les BAP n'ont été publiées que depuis peu par les industriels japonais et leur viabilité devaient être prouvée lors d'une utilisation sur chantier.

Les BAP, aussi appelé béton auto nivelant BAN dans le cas d'application horizontale (dallage, plancher), sont donc des bétons très fluides capable de remplir un coffrage fortement armé sans avoir recours à des moyens de serrage mécanique. Ils doivent être stable et homogène (résistance à la ségrégation pendant et après le coulage) et donner à la structure une qualité et une résistance au moins équivalentes aux celles d'un béton classique. On comprend donc bien que les BAP représente une avancée technologique importante qui à terme devrait remplacer la technique classique des bétons vibrés pour un bon nombre d'application.

C'est dans ce contexte que nous allons étudié le comportement aux états frais et durci des BAP à l'aide de différents essais que nous avons sélectionnés parmi ceux disponibles.

## 2 Historique du BAP

L'idée de produire des BAP est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique. Ces bétons très fluides étaient en même temps stables et présentaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (fluidité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau ; en effet, la première génération des BAP est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée. Ces bétons contiennent souvent des agents de viscosité ou agents colloïdaux afin de résister à la ségrégation des gros granulats et au phénomène de ressuage.

L'utilisation de cette nouvelle gamme de béton est en train de devenir de plus en plus répandue partout dans le monde. En effet depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les BAP ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est répandue dans le domaine de la construction.

Les BAP offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions, renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (bétons coulés sous l'eau pour des réparations, bétons confinés, pieux forés,.....etc.).

À titre d'exemple nous citerons quelques réalisations Japonaises :

- Le pont Kiba Park, où 650 m<sup>3</sup> de BAP ont été utilisés, avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa.
- Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 m<sup>3</sup> de BAP ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration.
- Le bâtiment Landmark Tower où un BAP d'excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune.
- Le stade de Fukuoka où 10 000 m<sup>3</sup> de BAP a été utilisé pour des sections très ferrillées et de formes compliquées.

D'autre part, plusieurs autres structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux, etc.) ont été construites totalement ou partiellement avec des BAP.

L'essor important de ce type de bétons se justifie par le fait qu'ils présentent de nombreux avantages :

### 2.1 Sur la mise en œuvre

- Diminution du temps de coulage.
- Suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages.
- Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes ».
- Possibilité de couler dans des endroits inaccessibles.
- Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération.

### 2.2 Sur la qualité du béton

Bon remplissage des éléments fortement ferraillés.

- Bon remplissage des éléments fortement ferraillés.
- Obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface).
- Et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

Concernant la conception :

- Permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton.
- Possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- Augmentation du coût des matières premières (quelques additions et adjuvants).
- Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans. Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du BAP dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles.

### 3 Les différents constituants d'un BAP

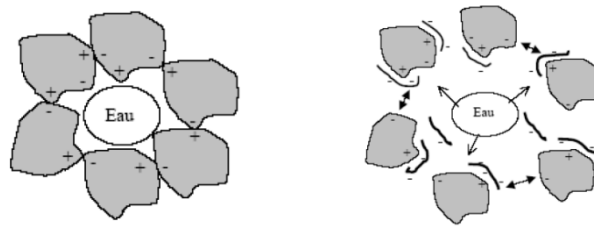
Formuler un BAP, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges données. Ce cahier des charges concerne la résistance à la compression du BAP à 28 jours, sa classe d'exposition, son ouvrabilité, c'est-à-dire l'étalement obtenu au cône d'Abrams, sa capacité de passage (évaluer par le rapport  $H_2/H_1$ ), et sa stabilité au tamis. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix.

#### 3.1 Gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en milieu confiné, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, le dosage en gravillons doit être suffisant pour contribuer à la compacité du squelette granulaire. Ceci conduit à adopter en général un rapport gravillon/sable G/S de l'ordre de 1, [4] Domonea fait une synthèse des travaux réalisés sur les onze dernières années en donnant les principales compositions utilisées pour 51 applications industrielles. Il en ressort que les gravillons utilisés sont généralement concassés, leur diamètre maximal n'excède guère 20mm. Pour notre cas en utilise un rapport G/S prise entre 0 à 0.7 qui donnera un béton de sable, et le diamètre maximal ne dépasse pas 8mm.

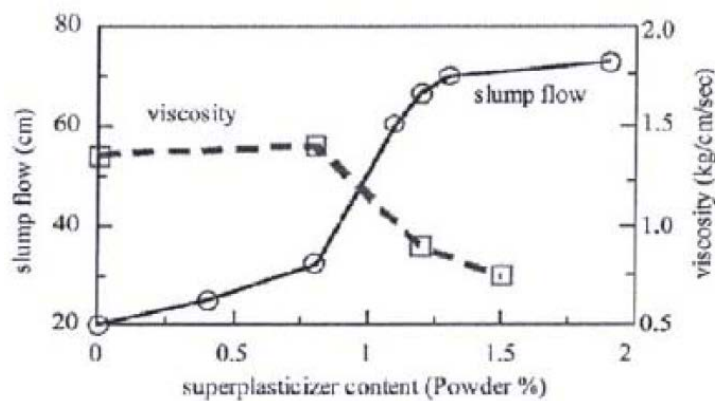
#### 3.2 Superplastifiants

L'apparition des BAP est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants [5] et [6]. Les superplastifiants sont des polymères à chaînes macromoléculaires très longues. Ils permettent de dé-floculer les grains de la poudre (ciment+ additions fines) au contact de l'eau en agissant par la combinaison d'effets de répulsion électrostatiques et stériques [7]. L'effet électrostatique permet de neutraliser les charges électriques présentes à la surface des grains alors que l'effet stérique engendre l'écartement des grains les uns des autres. Il en découle que l'eau initialement piégée se retrouve de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (Figure 1. 1).



**Figure 1. 1 :** Action du superplastifiant et Défloculation des grains de ciment

Une des conséquences de ces deux effets est la diminution des frottements inter granulaires. Ainsi, l'ajout de superplastifiant va engendrer une diminution de taux de cisaillement ( $\tau_o$ ) ce qui se traduit par une augmentation de l'étalement (Figure 1. 2).



**Figure 1. 2:**Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [8].

Alors que la viscosité du mélange n'est réduite que dans une moindre mesure puisque la fraction volumique des suspensions solides reste invariable.

Les superplastifiants peuvent réagir, également, avec les hydrates du ciment [9]. Ainsi, l'action d'un superplastifiant lorsqu'il est introduit dans un mélange est décomposée comme suit: une partie adsorbée, une partie consommée par les réactions avec les hydrates et une partie, en excès, reste en solution [10]. Par ailleurs, le degré de compatibilité d'une combinaison ciment / superplastifiant se mesure à travers le maintien dans le temps de l'étalement du BAP [6]. Certains auteurs Montrent que plus le dosage en superplastifiant et le rapport E/C sont élevés, plus le comportement rhéologique se maintient dans le temps [11], [12], [13], ont montré que l'augmentation du dosage du superplastifiant n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur caractéristique connue, Comme étant le dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la rhéologie du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc introduits dans la composition des BAP à un dosage proche du dosage à saturation. La valeur de cette caractéristique dépend du moment d'introduction du Superplastifiant lors du malaxage [14], [15], [13], [16]. Si l'introduction est retardée, le dosage à

saturation est plus faible car l'hydratation du ciment est amorcée ce qui implique une consommation du superplastifiant par les hydrates moins importante [5]. Ainsi, en retardant son introduction, on permet au superplastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides.

### 3.3 Additions des fines

Afin d'assurer une fluidité importante, une faible ségrégation, un ressuage négligeable et un meilleur arrangement granulaire, il faut introduire dans la formulation des BAP de fortes teneurs en fines minérales ( $\Phi_{\text{moyen}} \leq 63 \mu\text{m}$ ) : fumées de silice, laitiers, cendres volantes, fillers calcaires [17]. Les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. Certains ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation [18], montre que diminuer la taille des fillers a pour effet de réduire le seuil de cisaillement des BAP et de rendre la pâte plus épaisse (Figure 1. 3). Les résultats obtenus par [19] indiquent que diminuer la taille des cendres volantes incorporées dans la formulation des BAP améliore leur durabilité vis-à-vis de la diffusion des ions de chlorures.

Les travaux révèlent que l'ajout des fillers calcaires conduit à des BAP plus résistants que les BAP additionnés avec des cendres volantes mais moins durables notamment vis à vis de leur tenue au gel/dégel, [20], et de leur capacité à empêcher l'infiltration de gaz (CO<sub>2</sub>) ou de liquides corrosifs [21]. Le choix d'une addition minérale et de sa teneur dépend, donc, des exigences de résistance à la compression à 28 jours, d'ouvrabilité et des conditions d'expositions du BAP [22].

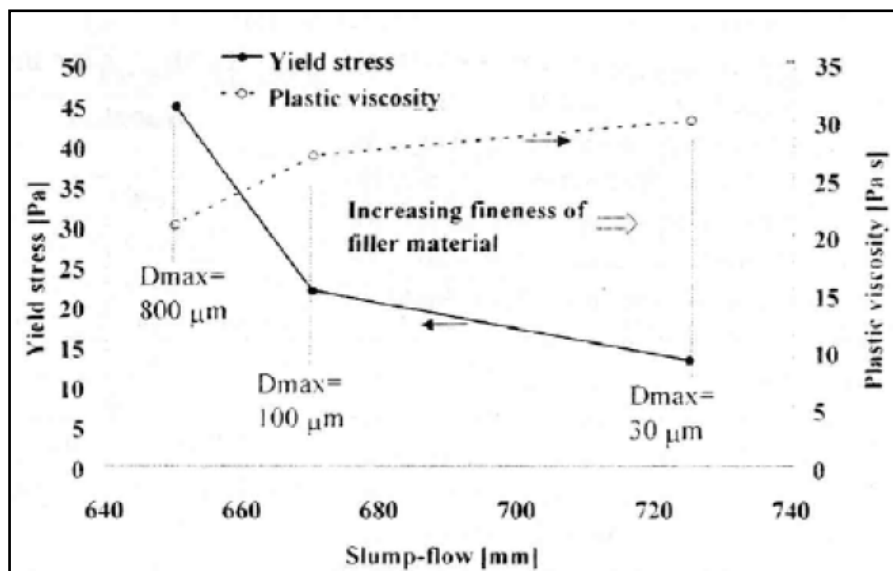


Figure 1. 3 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton[23].

L'analyse de 51 études effectuées cette dernière décennie [4] révèle que les fines les plus utilisées dans la formulation des BAP sont les fillers calcaires (28 cas sur 51).

Les fillers calcaires sont, généralement, utilisés pour limiter le dégagement de chaleur, réduire le Ressuage et augmenter la résistance à la compression notamment au jeune âge [24]. En effet, lorsque les particules calcaires sont bien dé-floculées par les superplastifiants, l'hydratation du ciment s'en trouve facilitée et l'obtention d'une matrice cimentaire de structure plus dense est favorisée. Il en découle une augmentation significative des résistances mécaniques à la compression [18], [25], [26] et [27].

Certains auteurs [21], ont introduit différents types de fillers calcaires dans la formulation des BAP. Ils montrent que quel que soit le type de filler utilisé, l'augmentation du dosage des fillers en remplacement du ciment conduit à un dosage en superplastifiant plus faible pour un étalement donné.

### 3.4 Addition des fibres métalliques

#### 3.4.1 Rôles des fibres dans le béton

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes ;
- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, (Figure 1. 4).

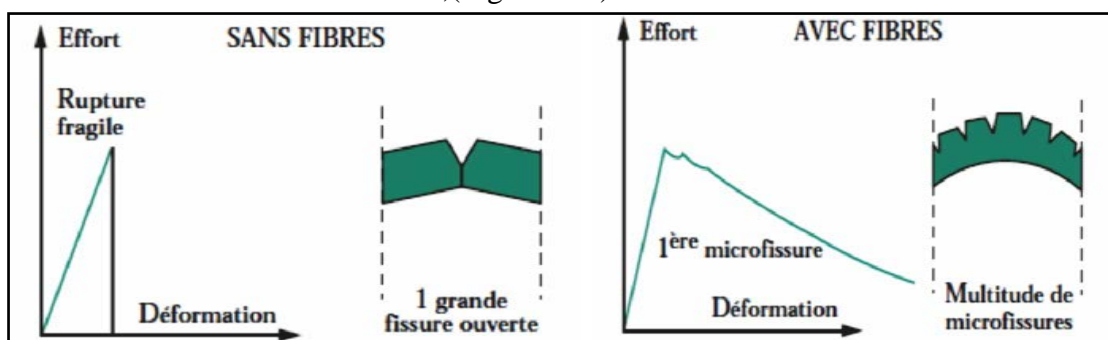


Figure 1. 4 : Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques [28].

Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent:

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire ;
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration ;
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge ;
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur) ;
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion [29].

### 3.4.2 Influence du dosage de fibres

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation préférentielle. La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres. La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élancement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante. La (Figure 1. 5), tirée de l'étude de [30], donne la variation de l'affaissement du cône d'Abrams en fonction de la teneur en fibres de polypropylène et d'acier.

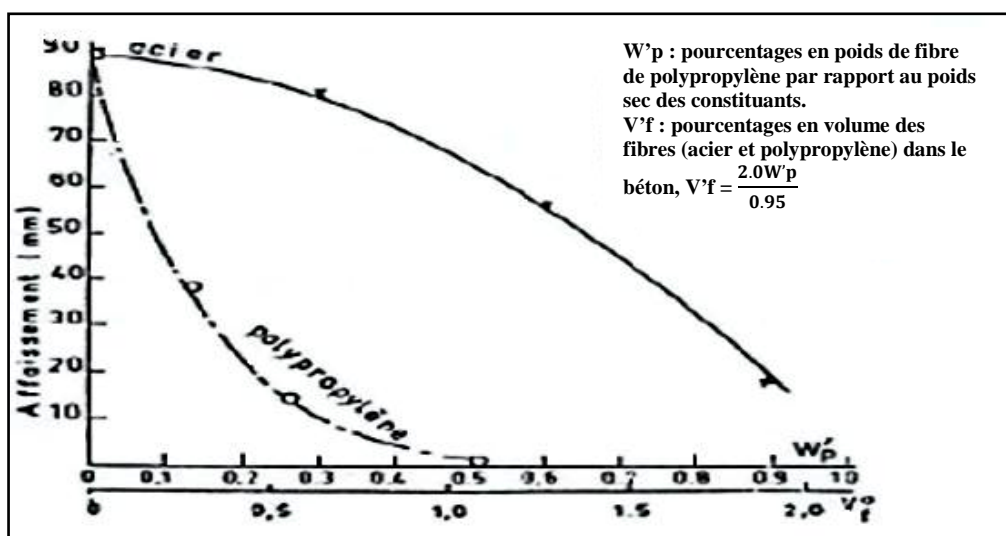


Figure 1. 5 : la variation d'affaissement en fonction des fibres de polypropylène et d'acier [30].

on peut conclure que plus le pourcentage de fibres, incorporées est important, plus la viscosité plastique est importante. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 2,5 %, la viscosité plastique augmente avec une pente très faible. Au-delà de ce pourcentage, cette dernière devient nettement plus grande, ce qui justifie la consistance élevée du milieu. Cela veut dire qu'au-delà de cette valeur de concentration de fibres métalliques, il n'y a plus d'écoulement du béton frais (Figure

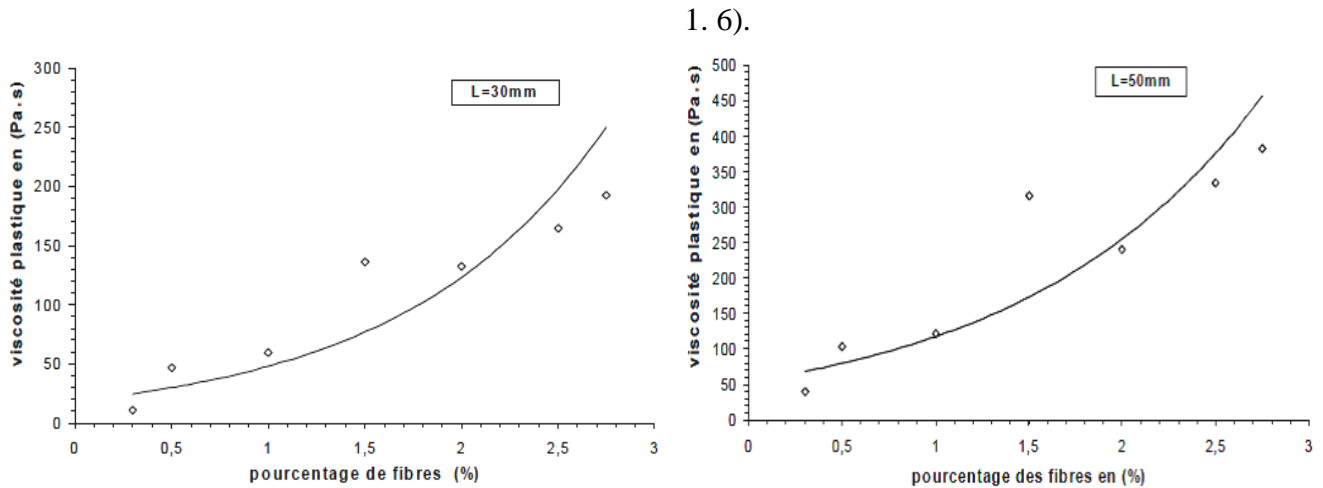


Figure 1. 6 : Variation de la viscosité plastique avec le pourcentage des fibres incorporées[31].

#### 4 Formulation du béton de fibres métalliques

L'optimisation de la composition des BFM est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice, ce qui a pour double conséquence de diminuer la maniabilité du matériau, et d'altérer sa compacité [29]. L'introduction des fibres dans une composition, préalablement optimisée, perturbe l'arrangement du squelette granulaire, ce qui conduit à la diminution de la maniabilité et à l'augmentation du volume des vides. MOENS, propose des limites au paramètre ( $V^*l/d$ ) qui caractérise bien l'effet de volume de fibres et l'élancement de la fibre. Il a pris en compte le dosage et la dimension du granulat [32].

Une étude approfondie de la formulation des bétons de fibres a été entreprise au LCPC par SERNA ROS. L'étude propose une relation empirique entre le module de finesse du béton sans fibres ( $M_{i0}$ ) et le module de finesse ( $M_{ip}$ ) du béton ayant un pourcentage en fibres (P%) [33]

$$M_{ip} = \frac{(M_{i0} - P_i)(M_{i0} - 5,16)}{1,8} \quad \text{Equ 1. 1}$$

Cette relation est traduite sur la (Figure 1. 7).

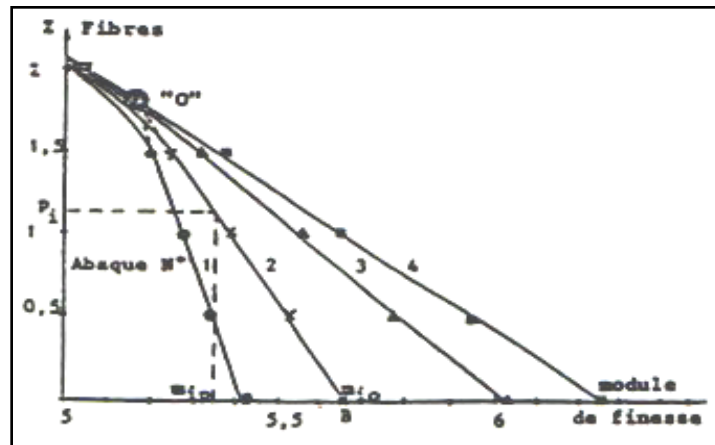


Figure 1. 7 : Abaque de formulation du béton de fibres.

L’auteur remarque aussi qu’en faisant varier le dosage en ciment (entre 325 et 475 kg/m<sup>3</sup>), la granulométrie optimale ne se trouve pas modifiée (vérifiant ainsi un des postulats de la méthode de BARON-LESAGE. Les conclusions de l’étude de SERNA ROS sont les suivantes :

- pour des bétons ayant un faible module de finesse (béton de petits granulats il est possible d’ajouter des fibres jusqu’à 1% (en volume) sans précautions particulières, et jusqu’à 2% et plus, en contrôlant bien la fabrication, avec de 1% de fibres, une faible variation de Dosage en eau provoque la formation de pelote de fibres (oursin) ;
- Pour des bétons ayant un module de finesse élevé (béton de gros granulats il faut limiter la teneur en fibres à 0,5 ou 0,6% (en volume) avec des dosages voisins de 0.5 ou 0.6%, tout excès de fibres risque d’entraîner la formulation d’oursin. Pour la composition d’un béton, la méthode BARON-LESAGE (1965) est basée sur deux hypothèses principales largement vérifiées par l’expérience
- Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C fixé), le béton le plus maniable est le plus compact, et son squelette minéral est optimal ;
- Le dosage optimal en granulats ne dépend pas de la nature et du volume en eau et en ciment.

#### 4.1 Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par SERNA.ROS

En se basant sur la méthode BARON-LESAGE par SERNA .ROS [34], a été établi un abaque pour la formulation des bétons de fibres métalliques. Les mesures de maniabilité sont faites à l’aide du cône D’ABRAMS, voir figure ci-dessous.

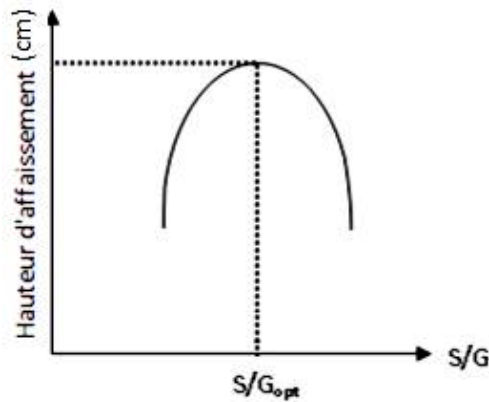


Figure 1. 8 : Détermination du rapport S/G optimal d’après SERNA ROS [34].

#### 4.2 Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par P. ROSSI

Ainsi pour P.ROSSI [35], la méthode de BARON-LESAGE a été la base pour élaborer sa Méthode d’optimisation. Cette méthode se résume dans les trois étapes suivantes :

- Fixer au départ le rapport E/C ainsi que le pourcentage des fibres à introduire dans le mélange ;
- Déterminer le rapport S/G optimal pour lequel la maniabilité est la plus grande ;
- Faire varier la quantité d’eau et de ciment, ainsi que la quantité de superplastifiant, afin d’obtenir la maniabilité souhaitée. Des mesures de maniabilité ont été faites à l’aide du Maniabilimètre LCL. Donc la courbe d’optimisation représente la variation du temps d’écoulement en fonction de la variation du rapport S/G (Figure 1. 9).

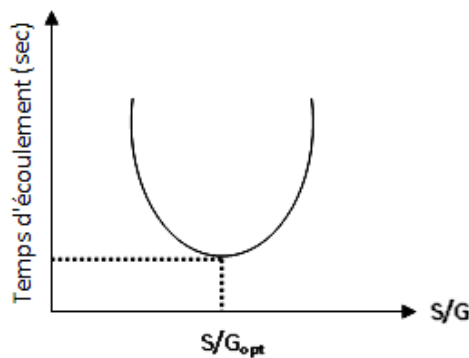


Figure 1. 9 : Détermination du rapport S/G optimal d’après [35].

### 5 Propriétés des BAP à l’état frais

Pour pouvoir le qualifier d’auto-plaçant, il faut s’assurer que la béton possède une très bonne capacité de remplissage qui résulte d’une déformabilité et d’une résistance à la ségrégation adéquates. De plus, le béton doit avoir une bonne stabilité volumique, c’est-à-dire diminuer au minimum le tassement, le ressuage et le retrait. Les propriétés à l’état frais sont : la capacité de remplissage-déformabilité-résistance à la ségrégation

## 5.1 Critères d'autonivelance

Avant de mettre en place un béton auto-plaçant, il faut s'assurer que le béton possède effectivement les qualités qu'on lui prête. Pour cela, il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton auto-plaçant, pour chaque essai, des valeurs minimales ont été trouvées et présentées.

## 5.2 Capacité de remplissage

La capacité de remplissage est à la fois caractérisée par un degré de remplissage (étalement, seuil) et par une vitesse de remplissage ( $t_{50}$ , temps au V-funnel et viscosité).

### 5.2.1 Etalement [NF EN 12350-8]

Cet essai est dérivé de l'essai d'affaissement. Au lieu de mesurer l'affaissement, qui est toujours supérieur à 25 cm pour un béton auto-plaçant, donc peu discriminant, il est suggéré de mesurer le diamètre moyen de l'étalement du béton. Il suffit de prendre deux mesures, à angle droit, et d'en faire la moyenne. Cet essai est très simple à faire puisque qu'on utilise le même équipement que pour l'affaissement.

On place en une seule fois un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée (Figure 1. 10). Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton. Le premier résultat de cet essai est exprimé par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton obtenue. Il permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton auto-plaçant. Plus l'étalement est élevé, meilleur est la déformabilité.

Pour l'ajout des fibres dans le BAP, quelque soit ça nature, il améliore la cohésion et par conséquent réduit la maniabilité. L'augmentation du rapport ( $l/d$ ) accroît le problème de distribution hétérogène et de floculation des fibres. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue [36].

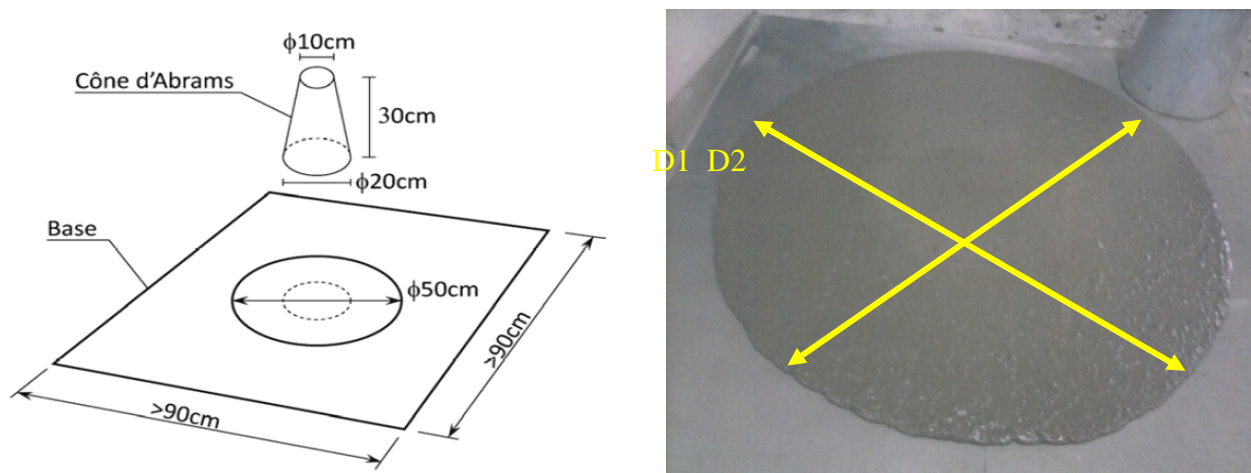


Figure 1. 10 : Mesure de l'étalement.

Il faut cependant noter que cet essai donne seulement une idée de déformabilité et qu'il faut donc le compléter par un essai mesurant la résistance à la ségrégation ou la capacité de remplissage [37].

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V -funnel).

### 5.3 Capacité de passage

Les BAP étant généralement destinés à être utilisés dans des conditions particulièrement difficiles de confinement (coffrage et armatures), il est important de qualifier leur capacité de passage qui renseigne sur leur habilité à passer au travers des armatures. Deux essais permettent de qualifier la capacité de passage du béton.

#### 5.3.1 Essai à l'anneau [NF EN 12350-12]

L'essai d'étalement à l'anneau (J-ring) est un essai d'étalement au cône d'Abrams ou l'écoulement du béton est perturbé par une série d'armatures placées autour du cône. Le résultat de cet essai est exprimé par la différence entre la mesure du diamètre d'étalement obtenu sans et avec l'anneau. S'il existe deux types d'anneaux avec plus ou moins d'aciers suivant la classe (Tableau 1. 1), l'écart maximal entre les deux étalements est toujours fixé à 10 cm (Figure 1. 11).

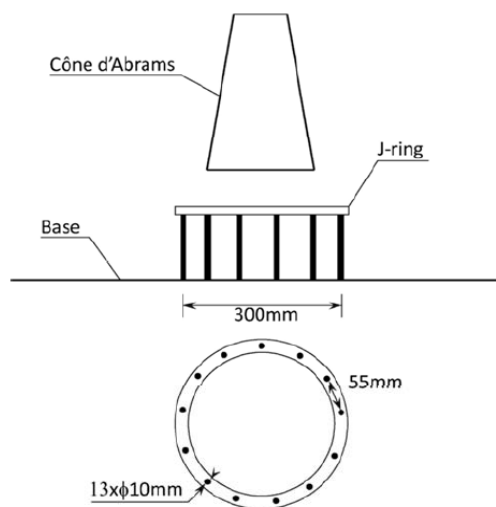


Figure 1. 11 : Essai d'étalement à l'anneau (J-ring)

Tableau 1. 1: Classes d'aptitude à l'écoulement - étalement à l'anneau

Classe Palier d'étalement à l'anneau en mm
PJ1 $\leq$ 100 avec 12 armatures
PJ2 $\leq$ 100 avec 16 armatures

### 5.3.2 Boite en L [NF EN 12350-10]

Dans cet essai, un échantillon de béton est coulé en une seule fois dans la partie verticale de la boîte. On ouvre ensuite la trappe située en partie inférieure et on observe l'écoulement travers une série d'armatures séparant la partie verticale et la partie horizontale de la boîte. Le résultat est représenté par le ratio  $H_2/H_1$  (Figure 1. 12). De la même manière que pour l'essai à l'anneau, il existe deux classes en fonction du nombre d'armature (2 ou 3) avec un ratio minimal fixe à 0,80. L'ensemble des essais a été réalisé dans les conditions de la classe PL2 (3 aciers).

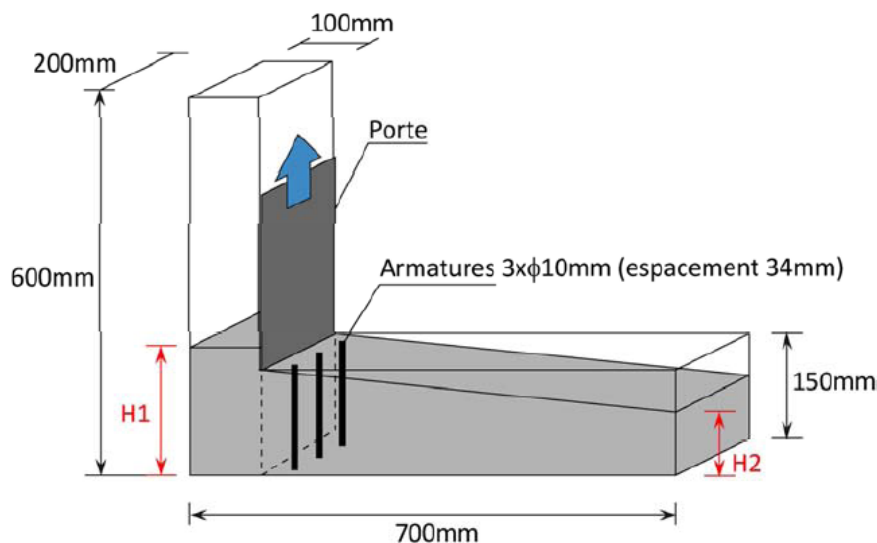


Figure 1. 12 : Essai à la boîte en L.

## 5.4 Maintien de la stabilité

Si les capacités de remplissage et de passage sont primordiales pour l'aspect auto-plaçant du béton, il faut en revanche que ce béton soit suffisamment homogène et stable pour que les propriétés du béton durci soient conformes aux attentes. Il faut donc que la ségrégation et/ou le ressuage soient faibles aussi bien en phase dynamique que statique. Un essai et deux observations permettent d'apprécier la stabilité.

### 5.4.1 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12350-11]

La stabilité au tamis est un essai quantitatif développé pour mesurer la ségrégation du béton en phase statique (Figure 1. 13). Il permet de mesurer la masse de laitance passant au tamis de 5mm, rapportée à la masse de béton versée sur le tamis. Deux classes sont définies aux (Tableau 1. 2).

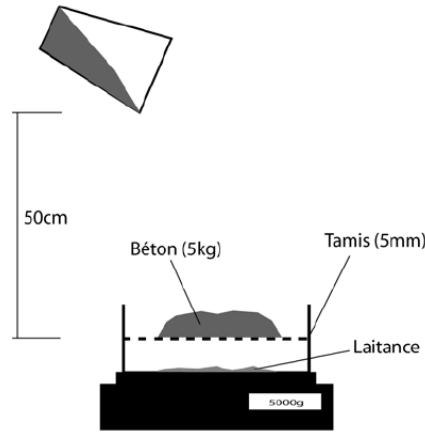


Figure 1. 13 : Essai de stabilité au tamis

Tableau 1. 2 : Classes de résistance a la ségrégation - essai de stabilité au tamis

Classes	Pourcentage de laitance
SR1	$\leq 20$
SR2	$\leq 15$

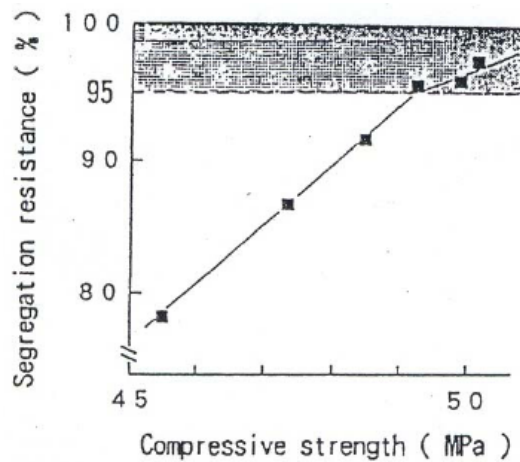


Figure 1. 14 : Effet de la ségrégation sur la résistance à la compression(essai du cylindre)

La résistance à la ségrégation est la résultant de plusieurs facteurs.la ségrégation est la séparation des différent constituants du béton due à une différence de densité.les gros granulats, par exemple, s'ils ont une densité supérieur à celle du mortier, coulent dans le béton, sous l'action de la gravité. Le mortier n'est alors pas apte à maintenir les granulats en place et, en conséquence, la qualité du béton durci en souffrir, on notera, entre autres, des différences significatives de résistance à la compression du béton en fonction de la résistance a la ségrégation comme le montre la (Figure 1. 14).

Cependant, les conséquences de cette tendance des granulats à séparer du mortier ne se font pas seulement sentir sur le béton durci, mais également lors de la mise en place du béton frais.

En effet, les collisions et les frictions inter granulaires peuvent provoquer la formation d'arches par les gros granulats au passage d'obstacles comme les barres d'armatures telles qu'illustrées à la (Figure 1. 15).

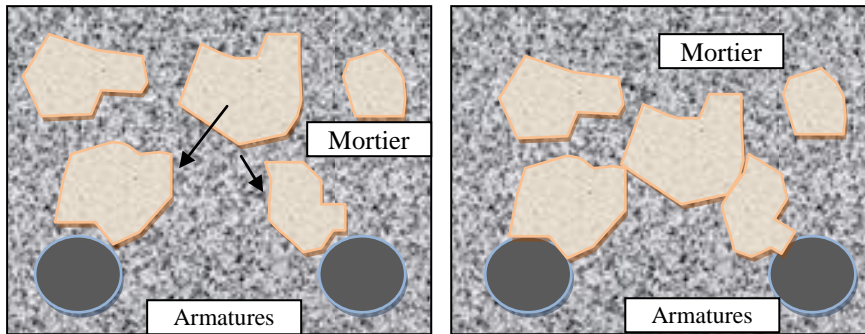


Figure 1. 15 :Formation d'arches pouvant bloquer l'écoulement du béton [38].

Ces arches ne laissent alors passer que le mortier et, graduellement cesse. La qualité du béton mis en place est, de ce fait, médiocre, le béton comportant des vides.

On peut diviser les méthodes de mesure de la ségrégation en deux groupes : le premier prend les méthodes de mesure sur le béton frais, alors le second concerne les méthodes de mesure sur le béton durci. Aucune méthode ne fait l'unanimité.

Une corrélation linéaire entre les résultats de pénétration, mesurée sur les mortiers des BAP par le plongeur et la stabilité au tamis des BAP a été établie [39],(voir Figure 1. 16).

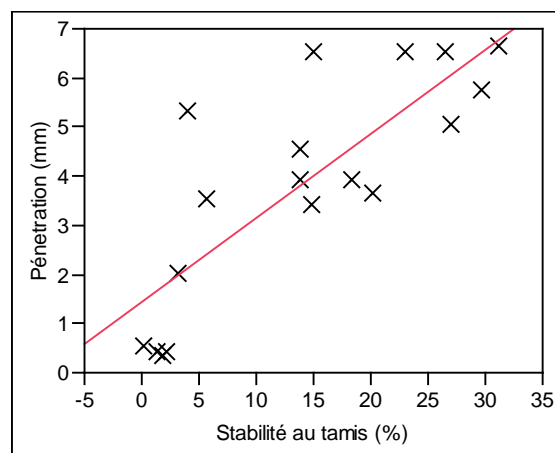


Figure 1. 16 : Corrélation entre la pénétration au plongeur et la stabilité au tamis [39].

### 5.5 Séquence d'essai

Ne pouvant pas réaliser l'ensemble des essais de manière simultanée, une chronologie, d'essai a été établie et respectée pour l'ensemble des bétons testé (Tableau 1. 3).

**Tableau 1. 3 : séquence des essais a l'état frais**

Essai	délai
1/ Immédiatement après le malaxage un essai d'étalement est effectué	t+0
2/ Un échantillon de béton est conserve à l' abri de l'évaporation pour l'essai de stabilité au tamis qui sera réalisé au bout de 15min de repos.	t+2 min
3/ Un essai d'étalement au J-ring est réalisé	t+3 min
5/ remalaxe (30 secondes) de manière a ré-homogénéiser le béton avant de lancer l'essai de passage a la boîte en L.	t+8 min
6/ Enfin on réalisé une mesure de masse volumique.	t+10min
7/ Finalement après 15min de repos l'essai de stabilité au tamis est réalisé	t+17min
8/ Des éprouvettes pour la réalisation des essais à l'état durci sont coulées et conservées dans une salle à hygrométrie et température contrôlées.	t+19min

## 6 Propriétés des BAP à l'état durci

Les particularités de composition des BAP conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques et physiques de ces bétons.

### 6.1 Résistances mécaniques

De nombreux travaux ont montrés que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [40], plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange (résistance mécanique, module d'élasticité, retrait,..) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

L'introduction des fibres métalliques permettre d'augmenter quasi linéaire de la résistance à la flexion du béton auto-plaçant en fonction du dosage volumique des fibres (Figure 1. 17) [41]

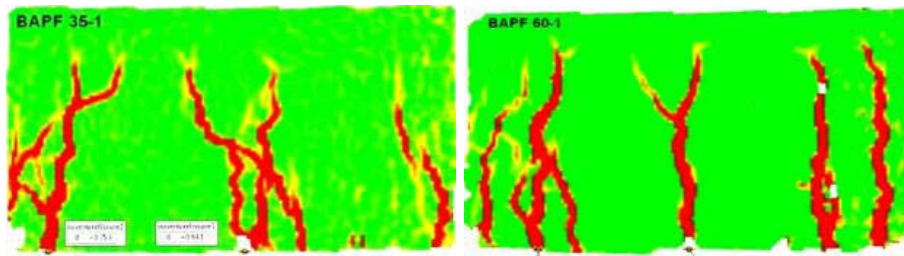


Figure 1. 17 : Formation d’arches pouvant bloquer l’écoulement du béton

L’utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [40]. Les particules fines du filler, lorsqu’elles sont bien dé-floculées par les superplastifiants, favorisent l’hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu’à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Différentes données ont été publiées [42], sur l’évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes voir (Figure 1. 18) [43].

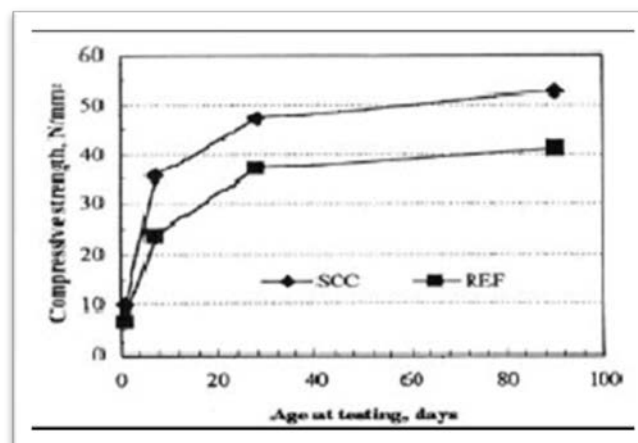


Figure 1. 18 Evolution de la résistance mécanique d’un BAP (SCC) et d’un BV (REF) Correspondant

De plus, certains auteurs [44], affirment que cette augmentation de résistance est d’autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande. Cet effet tend lui aussi à s’annuler au-delà de 28 jours. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l’évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l’introduction d’un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d’un BAP aux jeunes âges [45].

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d’augmenter le développement de la résistance mécanique [46]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu’ils engendrent, leur dosage

important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

## 6.2 Retrait

A la vue du volume de pâte plus important dans un BAP que dans un béton traditionnel, on peut penser que le retrait de dessiccation serait plus important. Les données de la littérature spécifique sont contradictoires même si les communications traitant ce problème montrent une tendance d'un retrait plus important pour les BAP.

### 6.2.1 Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [47], trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons traditionnels, voir (Figure 1. 19). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé.

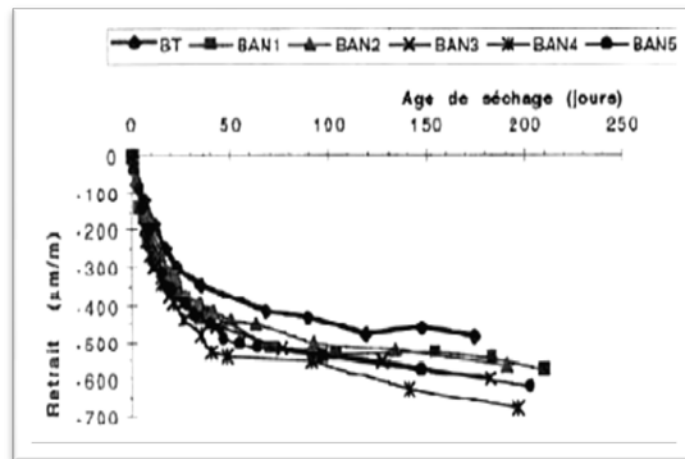


Figure 1. 19: Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et cinq BAP[47].

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [48], [46]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m/m}$  (à 180 jours).

### 6.2.2 Retrait (état frais).

Entre la fabrication et le début de prise, le béton ne présente pas de cohésion et se trouve en phase dite plastique. Pendant cette période, le béton subit une contraction de volume appelée premier retrait ou retrait plastique. Celui-ci est le résultat de plusieurs phénomènes chimiques ou physiques qui ont lieu dans un matériau en perpétuelle évolution. La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire voir (Figure 1. 20) [49].

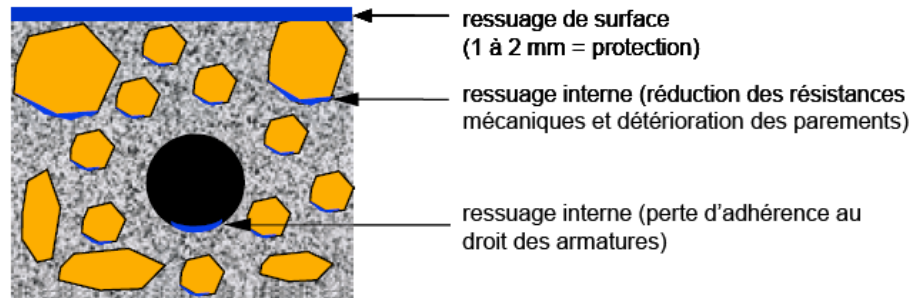


Figure 1. 20 : Phénomène de ressuage

## 7 Méthodes de formulation des BAP

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

– La première [50] [51] concerne des formulations fortement dosées en ciment, et contenant une proportion d'eau réduite.

La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m<sup>3</sup>), est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée), et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité.

Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

– Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [48], ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée, leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques, et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

Différentes techniques de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde.

Parmi les techniques de formulation les plus répandues on cite [52] :

- La méthode basée sur l'optimisation des mortiers.
- La méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire.
- La méthode basée sur l'optimisation de la pâte.
- La méthode chinoise.

### 7.1 Méthode basée sur l'optimisation de mortier

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs Japonais, Okamura et Ozawa sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Elle permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, sur dosés en liant et économiquement peu viables.

La méthode repose sur les concepts suivants :

Une quantité de gravillons limitée

Un rapport eau/poudre faible

Utilisation d'un superplastifiant

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire [53]. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif ( $\Gamma_m$ ) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative ( $R_m$ ) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

$$\Gamma_m = \frac{(d^2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad \text{Equ 1. 2}$$

$$R_m = \frac{10}{t} \quad \text{Equ 1. 3}$$

**d** : est le diamètre de la galette de mortier, **d<sub>0</sub>** : est le diamètre inférieur du cône, et **t** : est le temps d'écoulement du mortier.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre  $\Gamma_m$  et  $R_m$  pour un dosage en superplastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément  $\Gamma_m = 5$ , et  $R_m = 1$  [53], [54]. Edamatsu et al. [55] Proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres  $\Gamma_m$  et  $\frac{R_{mb}}{R_m}$  est constant.  $R_{mb}$  est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10 mm de diamètre. A partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre).  $R$  dans une certaine gamme, le rapport

## 7.2 Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte

Van Bui et Montgomery [56], présentent une méthode de formulation basée sur l'optimisation de la quantité de pâte. Ils montrent que :

Il existe une quantité de pâte minimum pour éviter les blocages lors de l'écoulement, Il existe une quantité de pâte minimum pour assurer la maniabilité du mélange.

La quantité de pâte minimum pour éviter les risques de blocage, soit la quantité de granulat maximum est calculée selon l'expression :

$$V_{ab \max} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) Nga}{\sum \frac{Pvg_m \cdot Nga \cdot \rho_s}{Vab_m} + \sum \frac{Pvs_n \cdot (1 - Nga) \cdot \rho_g}{Vab_n}} \quad \text{Equ 1.4}$$

Avec :  $\rho_g$  masse volumique des gravillons,  $\rho_s$  masse volumique du sable,  $Nga$  pourcentage de gros gravillons,  $Pvg_m$  et  $Pvg_n$  rapport entre le volume des gros granulats de classe m (respectivement des granulats fins de classe n) sur le volume total de granulats,  $Vab_m$  et  $Vab_n$  respectivement les volumes bloqués des granulats de classe m et n.

Ils prennent en compte la distance entre armatures ( $c$ ) et le diamètre d'une fraction granulaire dite que :

$$Dca = c / d_i \quad \text{Equ 1.5}$$

$$d_i = M_{i-1} + 3/4(M_i - M_{i-1}) \quad \text{Equ 1.6}$$

Avec :  $M_i$  et  $M_{i-1}$  sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire. Par ailleurs,

La quantité de pâte minimum requise pour obtenir une certaine fluidité est calculée par :

$$Vpd_{\min} = Vt - \frac{Vt - Void}{\left(\frac{Dss_{\min}}{Dav} + 1\right)^3} \quad \text{Equ 1. 7}$$

### 7.3 Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire

Le principe de formulation proposé par de Larrard [57], se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaire et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons.

Dans un empilement, si tous les grains sont arrangés de manière optimale, la compacité maximale ( $\gamma_i$ ) est atteinte (paramètre également appelé compacité virtuelle). Or dans la pratique, un empilement ne peut pas atteindre cette compacité virtuelle. Un paramètre a été calculé afin de rendre compte de la compactibilité des mélanges, c'est à dire la capacité des bétons à se mettre en place dans un moule donné, selon un procédé donné. Il est exprimé selon la forme :

$$K' = \sum_i K'_i = \sum_i \frac{y_i / \beta_i}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad \text{Equ 1. 8}$$

Avec:  $K'_i$  indice de serrage de chacune des classes granulaires,

$y_i$  est la proportion volumique des grains de diamètre  $d_i$ ,

$\beta_i$  est la compacité virtuelle des grains de classe  $i$ ,

$\phi$  est la compacité réelle du mélange, ( $\gamma_i$ ) est la compacité virtuelle lorsque la classe  $i$  est dominante.

En se basant sur ce concept et après validation expérimentale, de Larrard et Ferraris [57], proposent également des modèles pour décrire le seuil d'écoulement et la viscosité des bétons.

Dans le cas d'un dosage en superplastifiant proche au dosage de saturation, les expressions obtenues sont les suivantes :

$$\tau_0 = \exp(2.537 + 0.540K'_g + 0.854K'_s + 0.224K'_c) \quad \text{Equ 1. 9}$$

$$\mu = \exp\left(26.75\left(\frac{\phi}{\phi^*} - 0.7448\right)\right) \quad \text{Equ 1. 10}$$

Où  $\phi^*$  est la compacité maximale du mélange et les indices  $g$ ,  $s$  et  $c$  correspondent respectivement au granulat, au sable, et au ciment. Sedran [15] obtient des constantes légèrement différentes donnant une meilleure description des faibles viscosités :

$$\mu = \exp\left(45.88\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.8512\right)\right) \quad \text{Equ 1. 11}$$

Les différentes données sont ensuite insérées dans un logiciel calculant les différentes propriétés du béton. Ce logiciel permet également d’optimiser la formule de béton à partir d’un cahier des charges précis. La formulation des BAP ne se base pas sur une optimisation du squelette granulaire, mais sur l’optimisation d’autres propriétés, [57]et [53] ont ainsi défini un cahier des charges reporté dans le (Tableau 1. 4).

**Tableau 1. 4:**Cahier des charges d’un BAP [57].

critère	Paramètre	Cahier des charges
Auto-compactibilité	$K'$	$\leq 7$
Prévention de la ségrégation des gros grains	$K'_c$	$\geq 3.4$
Prévention du blocage des gros grains (ferraillage dense)	$K'_g$	$\leq 1$
Prévention de la ségrégation (stabilité générale)	$S^*$	$\leq 0.8$
Aptitude à l’auto-nivellement	$\tau_0$	$\leq 500Pa$
Pompabilité	$\mu$	$\leq 200/300Pa.s$
Coût	-	minimum

$$* S = \max S_i, \text{ et } S_i = 1 - \frac{\varphi}{\varphi^*}$$

Bien qu’il n’existe pas de méthode de formulation unique, quelques auteurs ont proposé des approches se basant sur une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une approche granulaire.

## Chapitre 2

### Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales

#### Introduction

Le comportement rhéologique et mécanique du béton de sable auto-plaçant renforcé de fibres d'acier est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, pour cette raison, nous allons dans un premier temps caractériser les matériaux utilisés dans cette étude en présentant leurs propriétés chimiques et physiques. Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes.

## 1 Granulats

### 1.1 Gravier

#### 1.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 80, Cet essai est réalisé suivant la norme NF P 18-598 [58].L'échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200D et 600D. Où D la plus grande dimension des granulats à analyser. On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis. Les résultats de l'analyse granulométrique du gravier G3/8 sont donnés dans le (Tableau 2. 1), et leur courbe granulométrique est montrée dans (Figure 2. 1 ;Figure 2. 2)

**Tableau 2. 1** : Analyse granulométrique par tamisage de gravier G3/8.

Echantillon : gravier (3/8 ),Température = 21 °C				Référence: NFP 18-553		
Masse de l'échantillon=3000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau 3/8	
10	-	-	-	100	100	-
8	97,3	97,3	3,24	96,76	85	99
6,3	728,7	826	27,53	72,47	55,5	80,3
5	896,3	1722,3	57,41	42,59	26,6	57,5
4	1005,3	2727,6	90,92	9,08	3,4	18,8
2,5	238,6	2966,2	98,87	1,13	1	15
< 2,5	32,5	2998,7	99,96	0,04	0	2

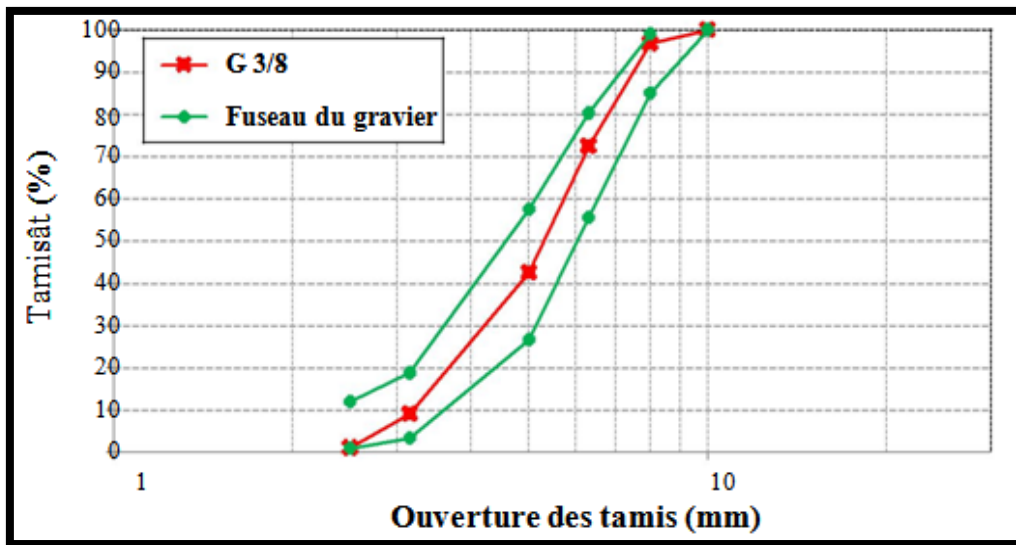


Figure 2. 1 : Courbe granulométrique du gravier G3/8.

### 1.1.2 Teneur en eau

La teneur en eau est le rapport du poids de l'eau d'un échantillon par rapport au poids sec.

La teneur en eau est donnée en (%) par la relation:

$$W = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad \text{Equ 2. 1}$$

Avec :

$P_h$  : Masse d'échantillon avant séchage.

$P_s$  : Masse d'échantillon sec.

Dans notre cas ont trouvé:  $W_{3/8} = 0.086 \%$ .

Donc notre gravier contient une faible teneur en eau.

### 1.1.3 Coefficient d'absorption

Cet essai est effectué conformément à la norme française P 18-554. Pour cela, un échantillon de granulats est plongé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique. A l'issue des 24 heures, on effectue sa pesée. Puis on calcule l'augmentation de masse par rapport à sa masse sèche. Enfin on obtient le coefficient d'absorption d'eau en effectuant le rapport de l'augmentation de masse à la masse sèche initiale (Equ.2.2)

$$C_{abs} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equ 2. 2}$$

Avec :

M<sub>h</sub> : masse de l'échantillon humide, à surface sèche.

M<sub>s</sub> : masse de l'échantillon sèche.

Dans notre cas, nous avons trouvé que :  $C_{abs}(3/8) = 0.5 \%$

#### 1.1.4 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est calculée d'après la norme NFP18-555. C'est le rapport de la masse d'échantillon (m) sec sur le volume total apparent (V<sub>tot</sub>)

V<sub>tot</sub> = volume des grains + volume de vide

La masse volumique apparente (γ<sub>app</sub>) est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{m}{V_{tot}} \quad \text{Equ 2. 3}$$

Pour le gravier nous avons trouvé :  $\gamma_{app}(3/8) = 1250 \text{ kg/m}^3$

#### 1.1.5 Masse volumique spécifique

On entend par masse spécifique la masse de l'unité de volume absolue d'un corps (volume matière plein). La masse volumique spécifique du gravillon peut être calculé par la formule suivante:

$$\gamma_{abs} = \frac{M_a}{V_s} \quad \text{Equ 2. 4}$$

M<sub>a</sub> : la masse de gravillon à l'air

V<sub>s</sub> : V<sub>2</sub> - V<sub>1</sub>, volume absolue de gravillon

V<sub>1</sub> : Volume d'eau initial

V<sub>2</sub> : Volume d'eau après l'introduction de l'échantillon.

Dans notre cas nous avons trouvé :  $\gamma_{abs}(3/8) = 2.51 \text{ g/cm}^3$

#### 1.1.6 Porosité

La porosité (P) est le rapport du volume du vide (v) au volume total V (Eq 2.5).

$$P = \frac{v}{V} = 1 - C \quad \text{Equ 2. 5}$$

Où la compacité (C) représente le volume du solide (V<sub>s</sub>) sur le volume total V (Eq 2.6).

$$C = \frac{V_s}{V} \quad \text{Equ 2. 6}$$

Dans notre cas, nous avons trouvé :C=0,498 donc P=0,50

### 1.2 Sable

Dans cette étude on à utilisé deux types de sable (Tableau 2. 2):

- Un sable de dune provenant de la région Nord de la ville de Laghouat (HAMDA).
- Un sable alluvionnaire a été extrait de l’oued M’zi (région de Laghouat).

#### 1.2.1 Masses volumiques

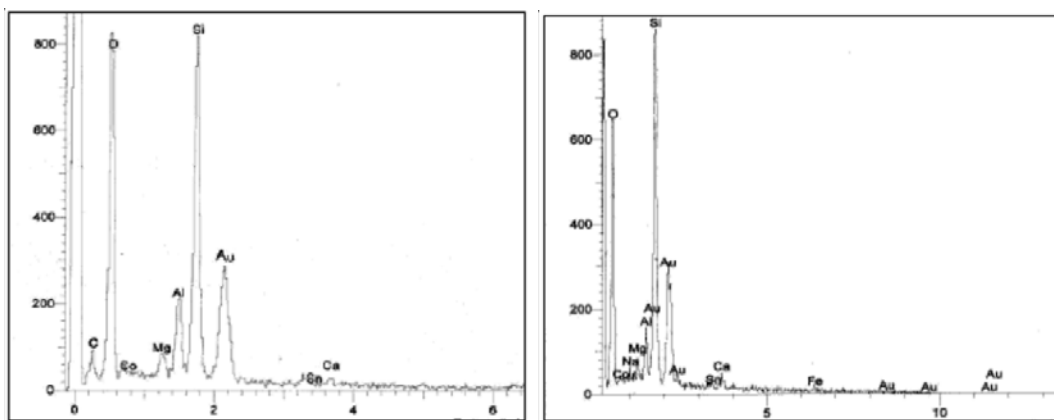
Les résultats des essais de la masse volumique apparente et la masse volumique spécifique des différents sables sont :

**Tableau 2. 2** : Masses volumiques apparentes et spécifiques des sables utilisés.

Type de Sable	Sable de dune SD	Sable alluvionnaire SA
$\gamma_{app}(\text{kg/m}^3)$	<b>1480,90</b>	<b>1549,76</b>
$\gamma_s(\text{kg/m}^3)$	<b>2666,67</b>	<b>2500,00</b>

#### 1.2.2 Analyse chimique

L’analyse chimique des deux sables, dunaire et alluvionnaire, fait par [59], a été menée avec le microscope électronique à balayage (MEB). Elle révèle la présence d’atomes de **Si** et **O**, ce qui correspond à la présence de l’espèce **SiO<sub>2</sub>**(silice).De plus le pourcentage atomique important de **Si** nous indique que **SiO<sub>2</sub>**est l’espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques, nous permettent d’établir que les deux sables contiennent aussi quelques traces, en comparaison avec SiO<sub>2</sub>, d’espèces calciques et magnésiennes, voir la (Figure 2. 2).Notons que les granulats siliceux sont ceux qui donnent les meilleures performances.



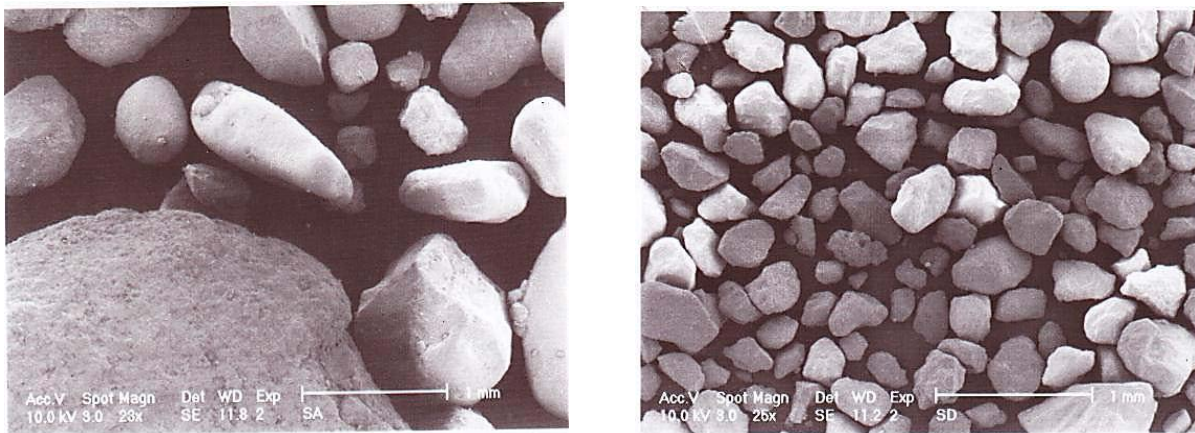
(a) Sable alluvionnaire SA (b) Sable de dune SD

**Figure 2. 2:**Analyse chimique des deux sables [59].

On remarque que les deux sables (SD et SA) sont très pur et à haute teneur en silice SiO<sub>2</sub>. Leur caractéristique chimique a montré que ces sables pourraient donner des résistances acceptables grâce à leur composition chimique siliceuse (la nature siliceuse donne souvent de meilleures performances).

### 1.2.3 Observation à grande échelle des deux sables

Les photos présentées à grande échelle par la (Figure 2. 3), montrent les deux sables (dunaire et alluvionnaire) visualisés par microscope électronique à balayage (MEB).



(a) – Sable alluvionnaire SA

(b) – Sable de dune SD –

**Figure 2. 3:**Observations des grains de sable au MEB [59].

La majorité des grains semblent avoir des formes arrondies avec une faible angularité. Les grains du sable alluvionnaire paraissent plus arrondis et plus gros que ceux du sable dunaire.

### 1.2.4 Capacité d'absorption d'eau du sable

C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Elle est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement [33],

Le rapport entre l'augmentation de la masse et la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption, qui ne doit pas dépasser les 5 % selon la norme, française [60], soit :

$$A_b(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \text{Equ 2. 7}$$

**M<sub>s</sub>** : Masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;

**M<sub>a</sub>**: Masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau pendant 24h à T=20°C.

Les résultats des essais sont résumés dans le (Tableau 2. 3).

**Tableau 2. 3:** Coefficient d'absorption d'eau des sables utilisés.

Type de sable	Sable alluvionnaire <b>SA</b>	Sable de dune <b>SD</b>
$A_b(\%)$	1.504	2.01

**1.2.5 Essai d'équivalent de sable**

L'équivalent de sable  $E_S$  indique le degré de pollution des éléments d'un sol. Il a pour but de mesurer la propreté et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles dans le matériau.

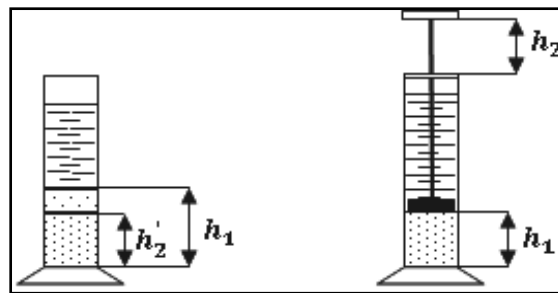
L'essai a été fait conformément à la norme française [58]. Deux indices sont déterminés :

➤ Pour l'équivalent de sable visuel :

$$E_{SV}(\%) = \frac{h_2'}{h_1} \times 100 \quad \text{Equ 2. 8}$$

➤ Pour l'équivalent de sable à piston

$$E_{SP}(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad \text{Equ 2. 9}$$



**Figure 2. 4:** Essai Equivalant de sable.

Les valeurs moyennes trouvées sont :

**Tableau 2. 4:** Equivalent de sable utilisé.

Type de sable	Sable alluvionnaire	Sable de dune
$E_{sv}$ à vue (%)	90,12	93,01
$E_{sp}$ à piston (%)	88,40	91,43

D'après ces valeurs on constate que le sable de dunes est relativement plus propre que le sable alluvionnaire. Mais les deux sables sont bons (très propres) selon [61].

1.2.6 Analyse granulométrique

Pour les deux types de sable, les analyses granulométriques effectuées sont données dans les (Tableau 2. 5 et Tableau 2. 6) et sont représentées dans les (Figure 2. 5 et Figure 2. 6).

1.2.7 Module de finesse

Les sables sont caractérisés par le module de finesse  $M_f$ . Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur les tamis de série suivant (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm). Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

$$M_f = \frac{\sum \% \text{ refus(cumulé)}}{100} \quad \text{Equ 2. 10}$$

Tableau 2. 5: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune SD

Echantillon : sable SD						
Référence dossier : NFP 18-553				Température = 22 °C		
Masse de l'échantillon=2000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau de sable	
5	0	0	0	100	100	100
4	0	0	0	100	100	80
2,5	0	0	0	100	90	80
1,25	0	0	0	100	90	50
0,63	39,4	39,4	1,97	98,03	70	30
0,315	498,7	538,1	26,90	73,09	40	15
0,16	1352,4	1890,5	94,52	5,47	20	5
0,08	98,3	1988,8	99,44	0,56	10	0
< 0,08	8,7	1997,5	99,87	0,12	0	0

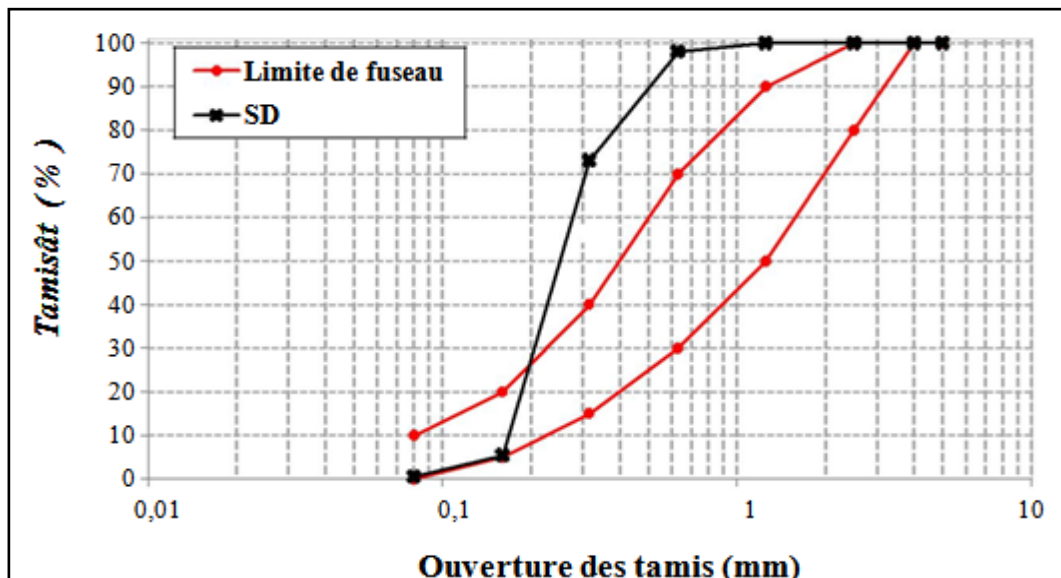


Figure 2. 5 : Analyse granulométrique du sable de dune SD.

Tableau 2. 6:Analyse granulométrique par tamisage du sable alluvionnaire SA

Echantillon : Sable Alluvionnaire SA				Température = 22 °C		
Référence dossier : NFP 18-553						
Masse de l'échantillon = 2000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau de sable	
5	0	0	0	100	100	100
4	10,1	10,1	0,505	99,49	100	80
2,5	46,3	56,4	2,82	97,18	90	80
1,25	127,2	183,6	9,18	90,82	90	50
0,63	1319,6	1503,2	75,16	24,84	70	30
0,315	345,5	1848,7	92,43	7,565	40	15
0,16	134,7	1983,4	99,17	0,83	20	5
0,08	11,4	1994,8	99,74	0,26	10	0
< 0,08	3,6	1998,4	99,92	0,08	0	0

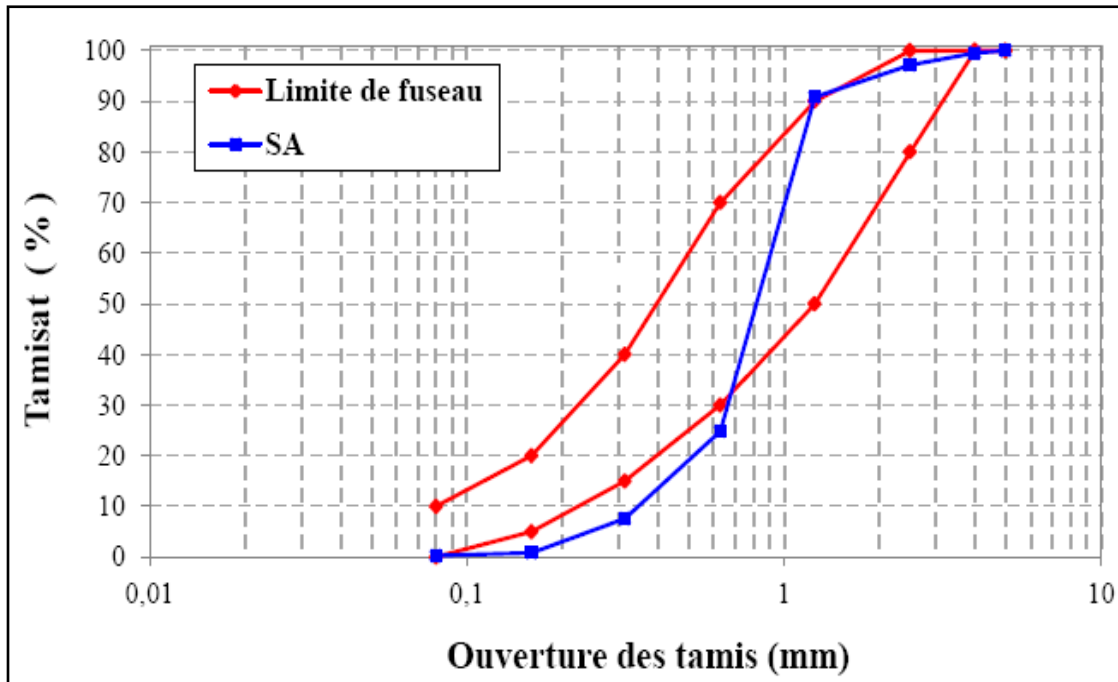


Figure 2. 6: Analyse granulométrique du sable alluvionnaire SA.

- Module de finesse du sable de dune (SD) est :  $M_{f1} = 1,23$
- Module de finesse du sable alluvionnaire (SA) est :  $M_{f2} = 2,79$ .

## 2 Ciment

Tous les bétons ont été fabriqués avec un type de ciment Portland CEM I 42,5R ES, pour béton à haute résistance conforme à la norme algérienne NA442/443 c'est un ciment de l'importation CEMEX ,(Figure 2. 7) venante de l'Espagne, elle est composée principalement du clinker, le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise, est dont les caractéristiques chimiques et physiques sont présentées respectivement dans le Tableau 2. 7.



Figure 2. 7: Ciments utilisés CEM I 42,5R ES.

Tableau 2. 7: Propriétés chimique et physiques et mécaniques du ciment.

Propriétés chimique	EL-KAOUI (Résultats moyens)
SO <sub>3</sub>	2.0 -2.2
La perte de poids par ignition	1.0 - 1.5
résidus insolubles	0.15 - 0.3
SiO <sub>2</sub>	20 - 21%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.44 - 5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 5.5%
CaO	62 - 63.5%
C <sub>3</sub> A	2.8 - 3.1%
Propriété physique et mécanique :	
Surface spécifique méthode de Blaine en cm <sup>2</sup> /g	3200 - 3300
Temps de prise initial (min)	150 - 200
Temps de prise finale (min)	210 - 250
RC Après 2 jours (N / mm <sup>2</sup> )	16 - 21
RC Après 7 jours (N / mm <sup>2</sup> )	27 - 32
RC Après 28 jours (N / mm <sup>2</sup> )	44- 48

### 3 Caractérisation du Filler calcaire

Pour les formulations de bétons de sable auto-plaçant fibré, une addition calcaire a été utilisée de type LF-E, conformes à la norme NF P 18-508. Elle se présente sous forme de poudre en cristal non abrasive de calcite caractérisée par une structure rhomboédrique. Les caractéristiques physiques des filler calcaire montrent qu'ils ont une masse volumique de 2700kg/m<sup>3</sup>, une surface Blaine de 2800cm<sup>2</sup>/g. Les Tableau 2. 8 et Tableau 2. 9, résumant les principales caractéristiques de ces fillers.

### 3.1 Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats d’analyses physico-chimiques du filler calcaire utilisé sont donnés dans les tableaux

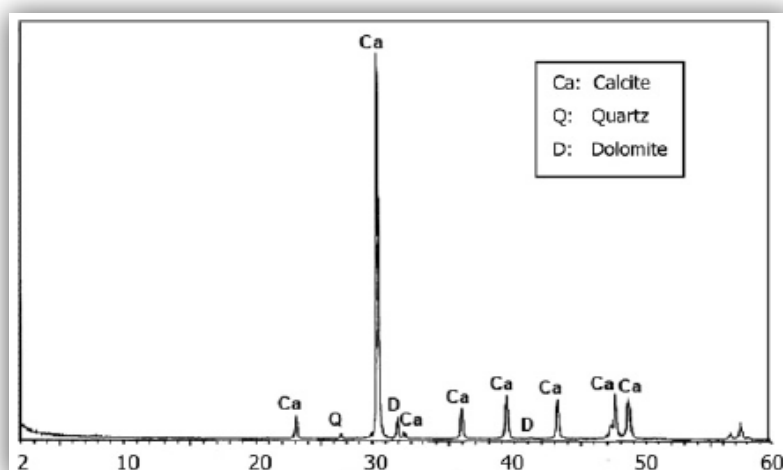
**Tableau 2. 8 :**Caractéristiques physiques du filler calcaire utilisé.

Caractéristique physique		
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique Absolue (kg/m <sup>3</sup> )	Surface spécifique de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
1530	2700	2800±100

**Tableau 2. 9:**Caractéristiques chimiques du filler calcaire utilisé

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	PAF
Contenu (%)	0.76	0.41	0.23	54.9	0.61	0.24	0.04	0.61	0.005	36.3

Les différents minéraux présents dans le filler calcaire sont donnés par le diffractogramme DRX suivant (Figure 2. 8).



**Figure 2. 8:**Diffractogramme aux rayons X des fillers calcaires

### 3.2 Indice d’activité

La détermination de l’indice d’activité nous permettra de choisir le coefficient d’équivalence dans le cas d’utilisation d’un liant équivalent. Cet indice donne une idée sur l’effet de l’addition lorsqu’elle est utilisée avec le ciment.

Par définition, l’indice d’activité est le rapport de la résistance à la compression entre deux spécimens de mortier testés au même âge (28 jours) : l’un est préparé avec 75% de ciment et 25% de l’addition (en masse), l’autre est préparé uniquement avec du ciment basant sur les résultats de la classe du ciment calculée au-dessus, l’indice d’activité du filler peut être calculé comme suit :

$$i = R_{c2}/R_{c1} = > 0.71$$

Equ 2. 11

## 4 Superplastifiant

Le superplastifiant (SP) utilisé dans notre étude est MEDAFLOW 30. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de troisième génération fabriqué par la société Granitex (ALGER). Il est conçu à base de poly carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortier 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.

### 4.1 Caractéristiques du MEDAFLOW 30

Forme .....liquide.

Couleur.....Brun clair.

Densité .....1,07 ± 0,01.

pH .....6 - 6,5.

Teneur en chlore.....< 1 g/l.

Extrait sec ..... 30%

Tableau 2. 10: Propriétés de superplastifiant sur béton durci

Désignation	Rc(Mpa)		
	3jours	7jours	28jours
Medaflow 30(1.4%)	39.2	54.7	62.2

## 5 Fibres métalliques

Les fibres métalliques utilisées sont de type tôle ondulée déformé commercialisées par la société GRANTEX, géométrie qui favorise l'ancrage dans la matrice du béton. C'est une fibre normalisée et commercialisée sous l'appellation Medafac, en utilisant ce type de fibre pour avoir leur effet sur le comportement du BSAPF vis-à-vis à la flexion en état durci et frais, et leur influence sur l'aptitude d'écoulement en milieux confinés, d'autre part l'introduction de ces fibres doivent être inertes dans le milieu cimentaire.

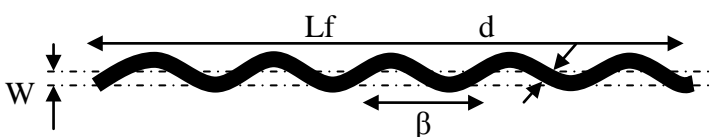
### 5.1 Caractéristiques des fibres

Il n'existe pas de normes spécifiques pour l'ordre d'introduction des constituants et la durée de malaxage pour les bétons fibrés. Les fibres sont à ce moment considérées comme des granulats et

un ajustement de la quantité des granulats intermédiaires et de liants est parfois nécessaire. Selon le type de fibres utilisé, leur géométrie et surtout la quantité spécifiée, il faut prévoir une séquence appropriée d'introduction des fibres et du malaxage du mélange.

Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées sont présentées dans le (Tableau 2. 11) d'après la fiche technique de GRANTEX.

**Tableau 2. 11:**Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées

Caractéristiques et Géométrie	
Type de fibre	tôle ondulée a froid
Masse volumique absolue	7800 kg/m <sup>3</sup>
Résistance a la traction typique du fil	1100 N/mm <sup>2</sup>
Allongement à la rupture	3-4(%)
Longueur nominale de la fibre Lf	Lf = 50 mm
Diamètre de la fibre d	d = 1mm
Rapport L/d	L/d=50
Longueur de l'onde β	β=8mm
La forme géométrique de la fibre	



## 6 Essais de caractérisations du BSAPF.

### 6.1 Introduction

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

A cet effet, des chercheurs ont développé différents types d'essais, on citera ci-après les plus répandus et qui ont été utilisés.

### 6.2 Propriétés des BAP à l'état frais

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les Propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères, établis selon les recommandations(AFGC).

Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude :

Essai d'étalement ou slump flow

Essai de J-Ring

Essai de L-Box

V-funnel

Essai de stabilité au tamis

La masse volumique

## 7 Essais effectués sur le béton BSAPF a l'état frais.

Lors de la fabrication, la caractérisation des BSAPF est nécessaire. Cela consiste à connaître leur comportement à l'état frais à partir de tests simples et reproductibles. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier rapidement la fluidité du matériau.

### 7.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump)

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné, est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams (Figure 2. 9). En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.



a)- appareillage



b)- les mesures

**Figure 2. 9:** Essai d'étalement au cône d'Abrams.

La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte ( $T_{500}$  par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50cm).  $T_{500}$  est un bon indice de coulabilité.

En 2008, les recommandations AFGC en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette: 550-850 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application). Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies [62] :

Pour l'essai de l'étalement la fourchette qui, nous intéressée contient des mélanges des différent composants variables soit G/S, E/C, VF, et FC, mais les autre mélange qui n'est pas dans la fourchette représentés des réponses hors domaine de notre étude, voir (Figure 2. 10 et Figure 2. 11).

### 7.1.1 Observation de la ségrégation

Lors de l'essai d'étalement, deux indicateurs visuels peuvent alerter sur l'homogénéité du béton. Soit l'apparition d'un dôme de granulats au centre de la galette qui indique que la pate n'a pas les propriétés suffisantes pour entrainer les plus gros grains. Soit, l'apparition de laitance en périphérie de la galette qui montre une séparation des phases du béton (Figure 2. 11-a).

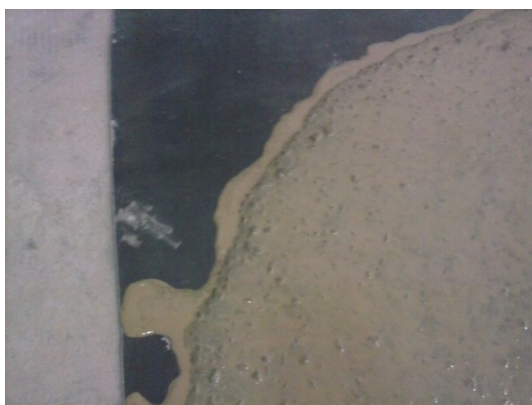


**a)-BSAPF31**



**b)- BSAPF04**

**Figure 2. 10:** Quelque mélange qui donnera une BSAPF, présenté dans et hors domaine d'étude



**a)-BSAPF03, taux de ségrégations =20.48%**



**b)-BSAPF03, taux deségrégation =2.61%**

**Figure 2. 11:**laitance en périphéries de la galette d'étalement

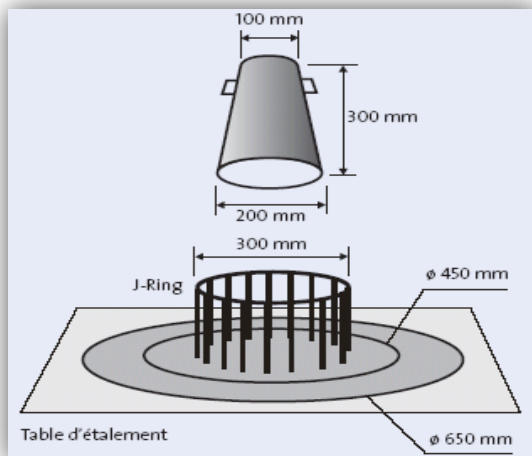


Figure 2. 12: Formation des pelotes des fibres.

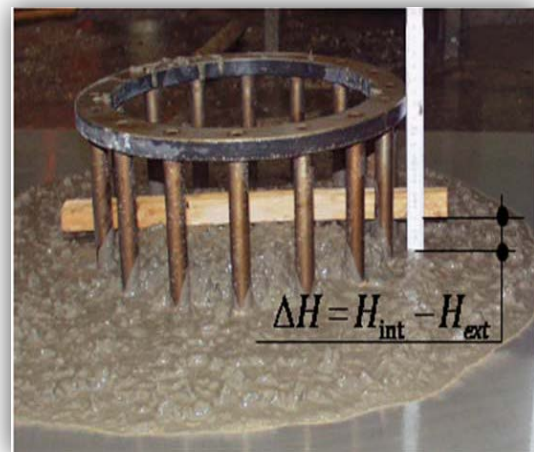
### 7.2 Essai d'étalement modifié (J-Ring)

Cet essai a le même principe que l'essai au cône, sauf que le béton s'écoule au travers des barres d'armatures [62]. Le but est d'évaluer sa tendance au phénomène de blocage.

Le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique; sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures de diamètre 16 à 28 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demie leur diamètre. On déduit que le BAP répond pleinement aux exigences recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et que la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau (FFigure 2. 13).



a)-Appareillage



b)-les mesures

Figure 2. 13: Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring).



a)-BSAPF15



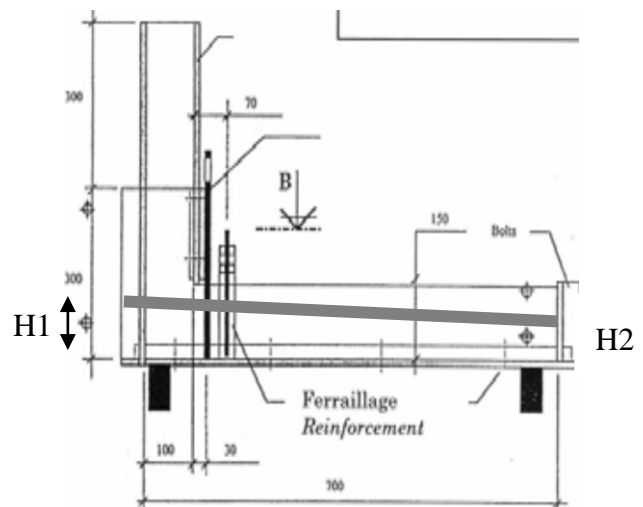
b)-BSAPF23

**Figure 2. 14:** a) mélange donnera une bonne aptitude au phénomène de blocage.  
b) le cas ou le mélange, ne donne pas une bonne aptitude au phénomène de blocage.

### 7.3 Essai de la boîte en L (L-Box)

Pour caractériser la mobilité des BAP en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L, (Figure 2. 15) fait partie de ces essais. La partie verticale de la boîte est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (41 mm entre 3 barres de diamètre 12 mm) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (59mm d'espace libre entre 2 barres).



**Figure 2. 15:** Appareil et dimensions de la boîte en L (L- BOX).

Pour qu'un BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H_2/H_1$ , doit être supérieur à 0,8 [62]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

Les différents essais qui ont été réalisés en trouvant certains mélanges leurs comportements vis à vis lors écoulement ne satisfait pas car la viscosité du mélange est trop élevé, pour cela on constatés le phénomène du blocage en zone confinée (Figure 2. 16).



**a)-BSAPF31**



**b)-BSAPF20**

**Figure 2. 16:**Phénomène du blocage en zone confinée.

#### **7.4 Essai de l'entonnoir en forme de V (V-funnel)**

Le principe de cet essai est de mesurer le temps d'écoulement du béton dans un espace limité (Figure 2. 17), l'essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement [63].



**Figure 2. 17:**Essai de l'entonnoir en forme de V.

Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 litres de béton passant à travers une ouverture étroite. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

### 7.5 Essai de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis (Figure 2. 18) permet de qualifier les bétons de sable auto-plaçant fibré vis-à-vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 min. Ensuite, verser 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 2 min On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis.

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton de sable auto-plaçants fibré de la façon suivante [62] :

$0\% \leq P \text{ laitance} \leq 15\%$       Stabilité satisfaisante.

$15\% < P \text{ laitance} \leq 30\%$       Stabilité critique.

$P \text{ laitances} > 30\%$       Stabilité très mauvaise.

Lorsque  $0 \leq P \text{ laitance} \leq 5 \%$ , la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ».

La pâte ou le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis. Cela peut conduire à une qualité de parements assez mauvaise.



**Figure 2. 18:**Essai de la stabilité au tamis.

## 8 Essais effectués sur le béton BSAPF durci

Les particularités de composition des BAP conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques et physiques de ces bétons.

Différents essais spécifiques permettent de caractériser notre BSAPF à l'état durci. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude :

Essai résistance à la compression.

Essai résistance à la flexion.

Mesure du retrait.

### 8.1 Détermination de la résistance mécanique en compression

Les mesures de résistance à la compression à différentes échéances (7, 28 jours) ont été effectuées dans le laboratoire sur des éprouvettes prismatique (7x7x28cm) conservées dans l'eau à 20°C. L'essai est réalisé conformément à la norme [NF P 18-406, 1988]. L'écrasement de l'éprouvette est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement force  $2,4 \pm 0,2$  KN/Sec Elle est constituée par deux plateaux. Celui du haut est fixe alors que celui du bas est relié à un piston exerçant une force axiale croissante P.

Chaque valeur de résistance est la moyenne des résultats de trois essais de compression par échéance et par matériau. La résistance à la compression  $F_{cj}$ , est calculée par la formule suivant :

$$F_{cj} = \frac{P}{S}$$

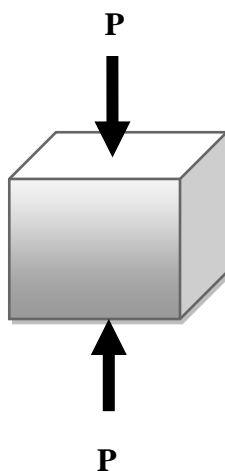


Figure 2. 19: dispositif de compression.

Avec :

$F_{cj}$ : Contrainte de compression (en MPa) ;

P: Charge de rupture (en KN) ;

S: Surface de compression de l'éprouvette (4900 mm<sup>2</sup>).

### 8.2 Essais de flexion (flexion 3 points)

Le comportement mécanique de tous les BSAPF a été étudié en flexion simple (3 points) sur des éprouvettes prismatiques (70×70×280 mm) conformément à la norme NF P. 18-407 [AFNOR, 1981]. A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple sur le bâti de flexion d'une presse (échelle maximale de la force : 50kN), asservie en force, suivant une vitesse de chargement de 0,05kN/s (Figure 2. 20).

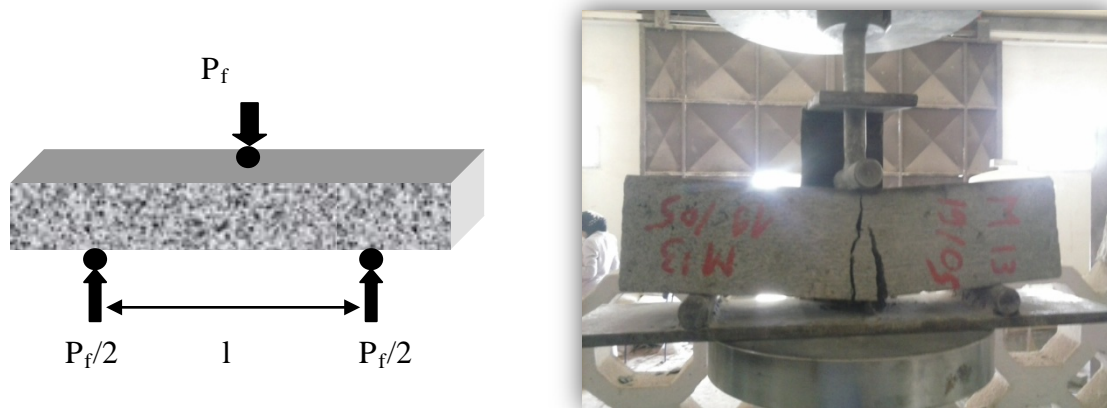


Figure 2. 20: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3 points).

Si  $P_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $P_f l/4$  et contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5 \times P_f \times l}{b^3}$$

### 8.3 Retrait

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes à l'état durci, dues aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires. Cet essai est réalisé sur matériau durci grâce à un rétractomètre permettant de mesurer les variations de longueur d'échantillons placés dans une salle climatisée à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et à  $55 \pm 5\%$  d'humidité relative, selon la norme NF P15-433 [AFNOR ; 1994], et selon deux Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance : on obtient le retrait total,

Après démoulage (à 24 heures), les mesures de retrait total et de retrait endogène sont effectuées sur trois éprouvettes prismatiques de dimension (70x70x280 mm). Elles sont exécutées à des échéances très courtes au début, la périodicité de mesure augmentant ensuite avec le temps (les éprouvettes sont disposées de manière à ce que chacune d'elles soit distante des voisines d'au moins 1 cm, et qu'elle soit entourée d'air sur toutes ses faces). Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le béton au coulage (ou collés sur les faces

rectifiées des éprouvettes). L'étalonnage du rétractomètre est effectué à l'aide d'une tige étalon en invariable qui sert de référence de mesure, (Figure 2. 21).

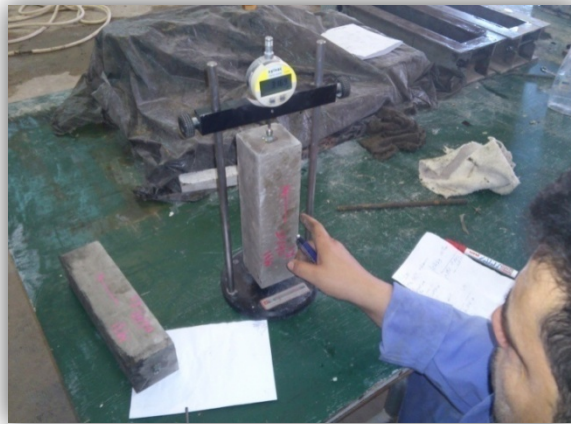


Figure 2. 21:mesures de retrait.

## 9 Méthode de plan d'expérience

### 9.1 Plans pour surfaces de réponse

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. On fait alors appel aux plans pour surfaces de réponse [64]. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert.

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

– pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \text{ Equ 2. 12}$$

– pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2$$

$$\text{Equ 2. 13}$$

**9.2 Présentation des plans composites**

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d’une étude. La première partie de l’étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle PDAI (termes du premier degré et termes d’interactions). Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l’étude s’achève le plus souvent, mais s’ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré. Les essais 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*. Les plans composites présentent donc trois parties (Figure 2. 22)

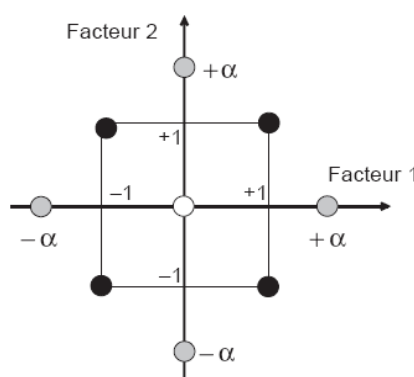
**Le plan factoriel :** c’est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d’étude.

**Le plan en étoile :** les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d’étude.

Les points au centre du domaine d’étude. On prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d’étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

Le nombre total  $n$  d’essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel ( $n_f$ ), des essais du plan en étoile ( $n_a$ ) et des essais au centre ( $n_0$ ). Le nombre  $n$  des essais d’un plan composite est donné par la relation :

$$n = n_f + n_a + n_0 \qquad \text{Equ 2. 14}$$



**Figure 2. 22:**Plan composite pour l’étude de deux facteurs [64]

Les points factoriels sont en noirs, les points en étoile sont en gris clair, les points centraux sont en blanc. Le nombre de niveaux est 5 pour chacun des facteurs et seulement 3 lorsque l’on a un plan composite à faces centrées.

En effet, il faut savoir que la précision des coefficients du modèle postulé est influencée par la position des points du plan d'expériences. Selon que les points sont bien ou mal placés, on peut obtenir les coefficients avec une bonne ou une mauvaise précision. Avec les plans à deux niveaux basés sur les matrices d'Hadamard (plans factoriels complets, fractionnaires et plans de Plackett et Burman), on est sûr que les points sont toujours bien placés. Avec les plans du second degré, il n'en est plus de même. Il faut choisir un critère de qualité pour les coefficients. En fonction de ce critère, on calcule la meilleure position possible des points d'expériences. On suppose que les points axiaux sont à la même distance (en grandeurs centrées réduites) du centre du domaine d'étude et cette distance est notée  $\alpha$ . Par exemple, on peut vouloir que l'erreur de prédiction soit la même pour des distances également éloignées du centre du domaine. Dans ce cas, on choisit le critère d'iso variance par rotation. La valeur de  $\alpha$  est égale à:

$$\alpha = n_f^{1/4} \quad \text{Equ 2. 15}$$

Si l'on veut que le plan composite satisfasse le critère d'iso variance par rotation il faut placer les points en étoile à une distance  $\alpha$  égale à la racine quatrième du nombre de points du plan factoriel.

On peut vouloir que les coefficients répondent au critère de *presque-orthogonalité*, il faut alors choisir  $\alpha$  tel que :

$$\alpha = \left( \frac{n_f (\sqrt{n_0 + n_f + n_\alpha} - \sqrt{n_f})^2}{4} \right)^{1/4} \quad \text{Equ 2. 16}$$

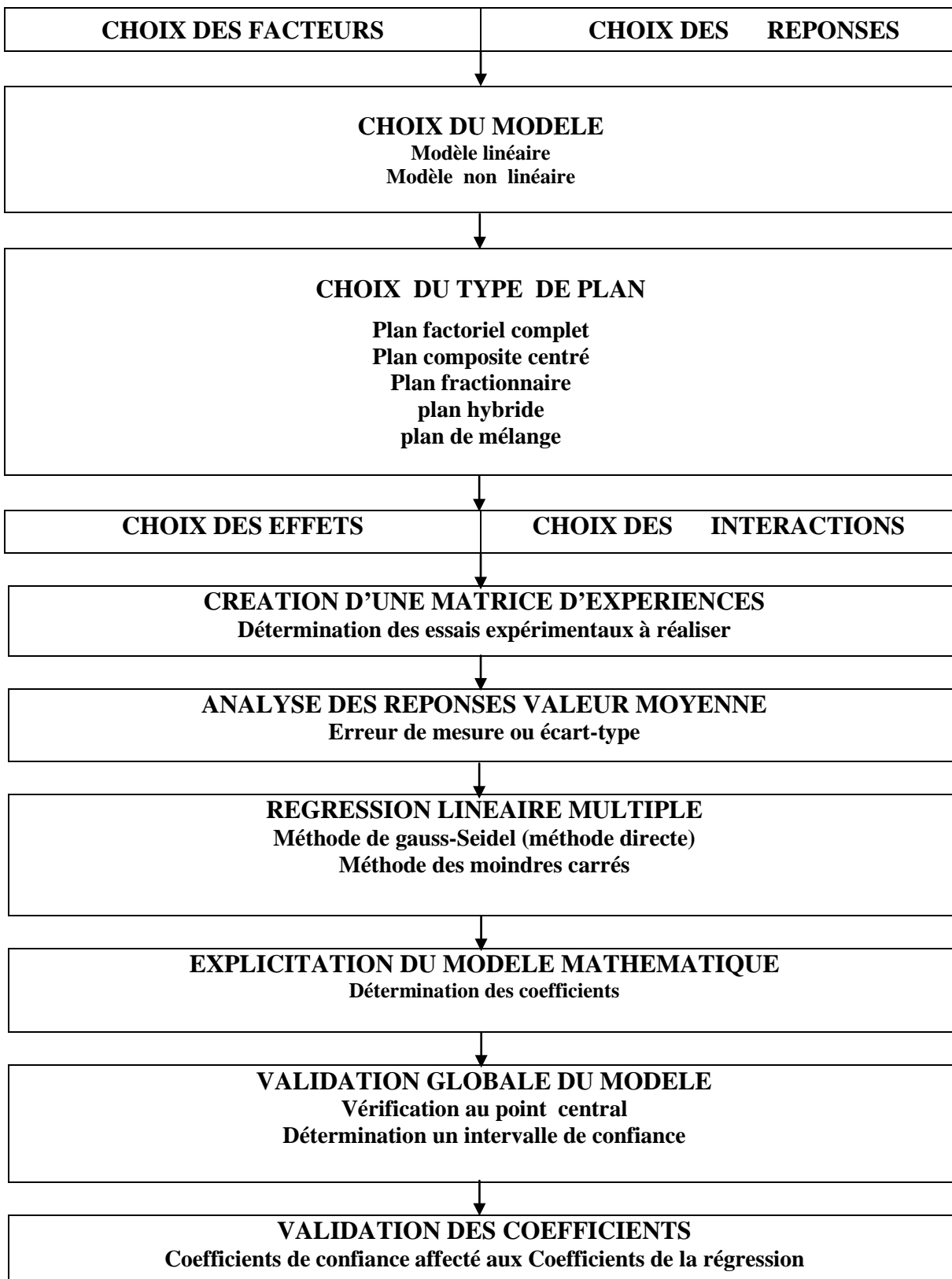
La valeur de  $\alpha$  est fonction du nombre de points au centre, du nombre de points du plan factoriel et du nombre de points du plan en étoile. Le (Tableau 2. 12) permet de choisir la valeur de  $\alpha$  pour les cas les plus souvent rencontrés

**Tableau 2. 12 :** Valeur de  $\alpha$  en fonction du nombre de points factoriels ( $n_f$ ), en étoile ( $n_\alpha$ ) et centraux ( $n_0$ ) pour le critère de presque-orthogonalité.

Nombre de facteurs	2	3	4	5	5	6	6
Plan	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^{5-1}$	$2^5$	$2^{6-1}$	$2^6$
nf	4	8	16	16	32	32	64
n $\alpha$	4	6	8	10	10	12	12
n0 = 1	1	1,215	1,414	1,547	1,596	1,724	1,761
n0 = 2	1,078	1,287	1,483	1,607	1,662	1,784	1,824
n0 = 3	1,147	1,353	1,547	1,664	1,724	1,841	1,885
n0 = 4	1,210	1,414	1,607	1,719	1,784	1,896	1,943
n0 = 5	1.607	1.664	1.719	1.724	1.770	1.943	1.950

9.3 Organigramme du plan d'expériences

**Organigramme 2.1** : Représente un aperçu détaillé de la démarche de traitement des plans d'expériences (Iouvet,1996)



### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux grandes parties : une première partie consacrée à la caractérisation des matériaux de base (sable, ciment, filler, fibres métalliques et adjuvant), utilisés dans nos formulations du BSAPF ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques. Les différentes propriétés mesurées s'avèrent satisfaisantes pour la confection de bétons.

Une deuxième partie est consacrée à la présentation des techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation de la formulation de béton de sable auto-plaçant renforcée par des fibres métallique. Ainsi que une présentation de la méthode de plan d'expérience que nous utilisée.

## Chapitre 3

### Influence des variations des composant du (BSAPF) sur leur propriété

#### Introduction

Ce chapitre est consacré pour étudier l'influence des paramètres de composant du BSAPF sur leur propriété et les résultats des essais réalisés au cours de notre travail expérimental et à l'interprétation de ces résultats. La préparation des échantillons a été effectuée en premier lieu, selon les recommandations de l'AFGC [62]. Ensuite, nous avons établis un plan de travail selon un plan d'expérience, réalisé à l'aide du logiciel JMP. Les résultats obtenus seront exploité par la suite en utilisant les fonctionnalités offertes par le JMP, qui permet de les visualiser d'une manière claire et simple en donnant toutes les informations nécessaires pour faire les interprétations.

#### But de travail

Notre travail consiste en une étude des propriétés à l'état frais et durci du béton de sable auto-plaçants fibré (BSAPF), et de voir les cinq facteurs qui nous imposé, ainsi les influences agissant sur les différentes propriétés, soit à l'état frais ou durci. Les réponses sont (V-funnel et ségrégations ; stabilité au tamis ; L-Box et étalement j-Ring) et les cinq facteurs sont (E/C) ;(G/S) ; Volume de fibre (Vf%) et dosage de filler calcaire(F.C) et superplastifiant (SP%).

## 1 Préparation des échantillons

### 1.1 Formulation

La formulation des échantillons a été conduite selon les recommandations de l'AFGC ;

Dans notre cas en utilise la méthode de plan d'expérience qui nous permet de choisir les facteurs et leur domaine de variation

Pour le Rapport Gravier/Sable (G/S), le domaine est pris entre (0 à 0.7) de raison pour obtenir un béton de sable [3].

Quantité des fines de l'ordre de 480 à 680 kg/m<sup>3</sup>

Dosage de superplastifiant (SP%)le domaine est pris entre 1 à 2.4

Volume de pâte est pris dans l'intervalle 380-460 l/m<sup>3</sup>.

(E/C) est pris entre 0.52 à 0.6

V.F(%) varié entre 0% à 0.7 % en poids de volume

Le détail des étapes de formulation est donné dans l'annexe (A.1).

## 2 Méthode de plan d'expérience

### Les facteurs

- Le rapport eau ciment : **E/C**
- Le rapport gravier sable : **G/S**
- Dosage de fillers : **F.C**
- Volume des fibres : **Vf**
- Adjuvant : **Sp**

### Les réponses

Les réponses pour des facteurs bien déterminés.

- Béton à l'état frais

1- Etalement (cm)

2- Etalement (cm) J-ring

3- Boite en L  $H_2/H_1$

4- V-funnel(s)

5- Stabilité au tamis (ségrégation)

6- masse volumique  $Kg/m^3$

- Béton à l'état durci

1- La résistance mécanique

a- La résistance à la compression.

b- La résistance à la flexion.

2- Le retrait

Proportion de 31 mélanges de **BSAPF** : sont classés par ordre des essais tiré de gauche à droite selon logiciel JMP, voire (Tableau 3. 1)

**Tableau 3. 1:** Proportion des mélanges du JMP.

Nb Mélanges	Configuration	Facteurs				
		E/C	G/S	Fillers	V f(%)	Sp(%)
BSAPF1	a0000	<b>0,50</b>	0,35	200	0,35	1,5
BSAPF2	-----	0,52	0,15	144	0,15	1
BSAPF3	----++	0,52	0,15	144	0,55	2
BSAPF4	---++	0,52	0,15	256	0,15	2
BSAPF5	---+-	0,52	0,15	256	0,55	1
BSAPF6	-+---+	0,52	0,55	144	0,15	2
BSAPF7	-+--+	0,52	0,55	144	0,55	1
BSAPF8	-++--	0,52	0,55	256	0,15	1
BSAPF9	-++++	0,52	0,55	256	0,55	2
BSAPF10	0a000	0,55	<b>0,0</b>	200	0,35	1,5
BSAPF11	00a00	0,55	0,35	<b>100</b>	0,35	1,5
BSAPF12	000a0	0,55	0,35	200	<b>0,00</b>	1,5
BSAPF13	0000a	0,55	0,35	200	0,35	<b>0,60</b>
BSAPF14	0	0,55	0,35	200	0,35	1,5
BSAPF15	0	0,55	0,35	200	0,35	1,5
BSAPF16	0	0,55	0,35	200	0,35	1,5
BSAPF17	0	0,55	0,35	200	0,35	1,5
BSAPF18	0	0,55	0,35	200	0,35	1,5
BSAPF19	0000A	0,55	0,35	200	0,35	<b>2,40</b>
BSAPF20	000A0	0,55	0,35	200	<b>0,70</b>	1,5
BSAPF21	00A00	0,55	0,35	<b>300</b>	0,35	1,5
BSAPF22	0A000	0,55	<b>0,70</b>	200	0,35	1,5
BSAPF23	+----+	0,58	0,15	144	0,15	2
BSAPF24	+---+	0,58	0,15	144	0,55	1
BSAPF25	+--+	0,58	0,15	256	0,15	1
BSAPF26	+---+	0,58	0,15	256	0,55	2
BSAPF27	++---	0,58	0,55	144	0,15	1
BSAPF28	++--+	0,58	0,55	144	0,55	2
BSAPF29	a0000	0,58	0,55	256	0,15	2
BSAPF30	-----	0,58	0,55	256	0,55	1
BSAPF31	----++	<b>0,60</b>	0,35	200	0,35	1,5

### 3 Méthodes d'essais sur BSAPF





Les essais de caractérisation des BAP ont été donnés en détail dans les chapitres précédents.

Nous résumons dans le tableau suivant les différents tests à réaliser :

**Tableau 3. 2:** Résumé des essais sur BSAPF

Essais	Grandeur spécifique	Valeur recommandée	photos
Etatement	SF(mm)	$550 \leq SF \leq 850$	
J-ring	Diamètre en présence de l'anneau SF(mm)	$550 \leq SF \leq 850$	
V-Funnel	$t_v(s)$	$8 \leq t \leq 14$	
L-Box	$H_2/H_1(\%)$	$\geq 80\%$	

Chapitre 3 Influence des variations des composants du (BSAPF) sur leur propriété

<p>Tamis</p>	<p><math>\pi</math> (%)</p>	<p><math>2 \leq \pi \leq 15</math></p>	
<p>Résistance mécanique à la compression R<sub>C</sub>-7 jours R<sub>C</sub>-28 jours</p>	<p>Contrainte d'écrasement en MPa</p>	<p>le maximum</p>	
<p>Résistance mécanique à la flexion R<sub>f</sub>-7 jours R<sub>f</sub>-28 jours</p>	<p>Contrainte de tractions en MPa</p>	<p>le maximum</p>	
<p>Retrait</p>	<p>(<math>\mu\text{m}/\text{m}</math>)</p>	<p>Le minimum</p>	

## 4 Exploitation des résultats et interprétations

### 4.1 Résultats des essais et discussions

Au premier lieu nous avons étudié les effets principaux et les interactions entre les variables avec un plan de surface de réponses, où le facteur de l'eau/ciment, dosage de fillers calcaire, et leurs interactions FC. E/C et FC.Vf sont plus hauts que l'erreur expérimentale, alors que l'effet du volume des fibres métalliques est légèrement inférieur. La valeur de courbure est également plus haute que l'intervalle de confiance de l'effet de courbure. Ainsi, un modèle linéaire du premier degré pour déterminer l'influence entre les variables ne peut pas être considérée, et ceci signifie que la conception factorielle complète doit être augmentée par une conception d'étoile pour tenir compte d'un tel effet de courbure. Le domaine expérimental model s'est composé des mélanges s'étendant entre les variables codées de -1,771 à +1,771 (Tableau 3. 3).

**Tableau 3. 3 : les valeurs codées et absolus**

Facteurs	Niveaux					Les pas
	-1,771	-1	0	+1	+1,771	
E/C	0,50	0,52	0,55	0,58	0,60	0,03
G/S	0	0,15	0,35	0,55	0,7	0,2
F.C	100	144	200	256	300	56
V. fibres(%)	0	0,15	0,35	0,55	0,70	0,2
Sp(%)	0,6	1	1,5	2	2,4	0,5

Les valeurs absolues des variables étudiées, à savoir le rapport E/C, la teneur en filler calcaire FC, et le dosage en fibre métalliques Vf% pris en compte dans le plan de surface de réponses (PSR), ainsi que les résultats des essais des 31 bétons employés dans le PSR sont récapitulés dans les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6 ,Pour les mélanges proportionnés avec E/C de 0.50a 0.6. Le dosage en superplastifiant 0.6 a 2.4 a été imposé pour obtenir un étalement entre 50 à 85mm. qui nous donne des plusieurs formes de béton ferme plastique et liquide. Le volume de fibre Vf% varie entre 0 a 0.7%, le filler calcaire FC est a un dosage entre 100 a 300 Kg/m<sup>3</sup>.Le rapport de sable G/S varie entre 0 à 0.7

Les résultats présentés dans le tableau3.4 permettent de comparer l'effet des divers paramètres et sur les propriétés du BSDFM. Á l'exception de quelques interactions entre certains paramètres, il y a au moins 95% de chance que le coefficient contribuant à la prédiction de la réponse soit précis.

Une estimation négative signifie que le paramètre participe à la diminution de la valeur de la réponse.

Les coefficients de corrélation des réponses étudiées sont acceptables ( $R^2 > 0,688$ )

Les (Tableau 3. 6 ;Tableau 3. 7) ; donne l'estimation des coefficients et la probabilité de signifiante de chaque réponse. La signifiante d'une réponse est considérée dans le cas où la probabilité est inférieure ou égale à 0.05 (ce qui correspond à un intervalle de confiance de 95% pour qu'une réponse soit représenté par le modèle correspondant : voir graphiques des valeurs observées en fonction des valeurs prévues).

Tableau 3. 4: Proportions et résultats des essais

N° Mélanges	BSAPF1	BSAPF2	BSAPF3	BSAPF4	BSAPF5	BSAPF6	BSAPF7	BSAPF8	BSAPF9	BSAPF10	BSAPF11	BSAP12	BSAPF13	BSAPF14	BSAPF15	BSAPF16	
E/C	0,50	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	
G/S	0,35	0,15	0,15	0,15	0,15	0,55	0,55	0,55	0,55	0,00	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
Fillers	200,00	143,52	143,52	256,48	256,48	143,52	143,52	256,48	256,48	200	100	200	200	200	200	200	
V f(%)	0,35	0,15	0,55	0,15	0,55	0,15	0,55	0,15	0,55	0,35	0,35	0	0,35	0,35	0,35	0,35	
Sp(%)	1,50	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	1,50	1,50	1,50	0,60	1,50	1,50	1,50	
V-funnel (s)	28	/	8,08	27,84	/	7,1	/	/	8,45	/	7,05	11,8	/	5,32	5,74	5,45	
Boite en L	h1	/	/	7,8	9,8	/	7,5	/	/	7,7	/	10,2	7,5	/	8,0	7,6	7,8
	h2	/	/	7,3	3,8	/	7,2	/	/	7,4	/	6	6,5	/	6,4	7,2	7,1
	%	/	/	93,59	38,77	/	96	/	/	96,1	/	58,82	86,66	/	80	94,73	91,62
Étalement (cm)	33,16		74	41,33	//	80,5	25,75	21	83,75	30,13	60,75	51	/	73,5	79,75	78,5	
Ségrégation (%)	/	/	2,61	7,25	/	3,2	0,46	/	10,45	/	2,77	7,06	/	5,31	6,46	5,27	
J-Ring (cm)	H int	/	/	2,5	5,75	/	2,1	/	/	1,7	/	5,45	1,8	/	2,3	2,4	2,5
	H ext	/	/	1,3	2,5	/	1,6	/	/	1,3	/	1,5	1,4	/	1,55	1,50	1,45
Jint-Jext(cm)	/	/	1.2	3.25	/	0.5	/	/	0.4	/	3.95	0.4	/	0.75	0.9	1.05	
Étalement(cm)	/	/	71,75	36,75	/	75,5	/	/	83,13	31,25	50,13	48,2	/	71	75,5	74,5	
Masse V (kg/m3)	2215	2139	2362,5	2166,25	2230,8	2354	2249	2257	2423	2236	2239,25	2280	2237,25	2247	2325,3	2310	
Rc 7 J(MPa)	26.54	27.28	30.90	28.56	26.97	40.00	30.96	32.41	44.10	20.62	29.22	29.40	28.50	32.63	31.64	36.10	
Rc 28 J(MPa)	28.48	39.13	44.67	30.65	32.21	47.20	35.10	37.82	51.70	22.37	34.61	34.04	32.82	39.74	39.92	41.44	
Rf 7 J(MPa)	4.21	3.77	4.81	4.66	4.50	4.93	5.20	5.89	6.92	3.44	4.95	4.67	5.34	4.58	5.31	5.30	
Rf 28 J(MPa)	5.18	4.54	6.19	5.82	6.13	6.73	5.65	6.42	7.85	4.91	5.84	5.52	6.60	5.97	6.75	6.89	

Chapitre 3 Influence des variations des composants du (BSAPF) sur leur propriété

N° Mélanges	BSAPF17	BSAPF18	BSAPF19	BSAPF20	BSAPF21	BSAPF22	BSAPF23	BSAPF24	BSAPF25	BSAPF26	BSAPF27	BSAPF28	BSAPF29	BSAPF30	BSAPF31	
E/C	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,60	
G/S	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,70	0,15	0,15	0,15	0,15	0,55	0,55	0,15	0,55	0,35	
Fillers	200,00	200,00	200,00	200,00	300	200,00	143,52	143,52	256,48	256,48	143,52	143,52	256,48	256,48	200,00	
V f(%)	0,35	0,35	0,35	0,70	0,35	0,35	0,15	0,55	0,15	0,55	0,15	0,55	0,15	0,55	0,35	
Sp(%)	1,50	1,50	2,40	1,50	1,50	1,50	2,00	1,00	1,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,50	
V-funnel (s)	5,76	5,8	6,09	7,01	7,15	5,15	6,45	/	/	5,09	6	3,52	4,49	9,47	5,08	
Boîte en L (%)≥80%	h1	7,9	7,8	7,8	8,8	8	7,5	11,2	/	/	8,1	15	7,5	8,2	13,8	8,6
	h2	7,5	7,4	7,2	6,5	6,8	7,3	627	/	/	6,8	0	7,4	6,4	0	7
	%	94,49	93,58	92,30	73,86	85	97,33	58,82	/	12,7	83,95	0	98,66	70,05	36,5	82,35
Étalement (cm)	76,5	77,5	82	68,83	67	81,25	52,5	/	26	77,25	37,75	86,25	90,75	213	72	
Ségrégation (%)	4,75	5,20	9,22	1,78	6,37	9,92	2,56	0,8	0,33	10,68	0,35	20,48	23,26	/	/	
J-Ring (cm)	H <sub>int</sub>	2,7	2,5	2,6	3,63	2,7	1,8	7,5	/	/	1,8	7	1,5	1,8	/	1,8
	H <sub>ext</sub>	1,6	1,5	1,4	1,5	1,5	1,,3	2,2	/	/	1,3	0	1,3	1	/	1,2
Jint-Jext(cm)	1.1	1	1.1	2.13	1.2	0.5	5.3	/		0.5	7	0.2	0.8	/	0.6	
Étalement(cm)	74,5	75	80,33	63,5	63,5	81,25	39	/	/	82	33	283	88,5	/	80,33	
Masse V (kg/m3)	2335	2317	2354,5	2281	2281	2392	2254	2128	2141,3	2310	2310	2413	2374,5	2318	3222	
Rc 07 J(MPa)	33.62	33.33	39.37	33.51	32.04	40.83	27.91	23.11	22.68	32.91	32.13	38.73	31.73	42.13	30.22	
Rc 28 J(MPa)	40.93	39.73	45.78	42.60	37.08	46.61	30.61	25.83	24.89	38.48	35	47.91	36.78	47.53	30.54	
Rf 07 J(MPa)	5.28	4.52	6.08	4.68	5.20	6.06	4.43	4.17	3.85	5.50	5.17	5.73	4.87	5.77	4.20	
Rf 28 J(MPa)	6.74	5.97	6.46	6.99	6.31	6.40	5.44	4.89	4.90	6.56	6.35	7.02	5.67	7.65	4.67	

#### 4.2 Traitement des données

Pour le traitement des données et l'établissement des modèles, un logiciel commercial JMP (*JMP7 SAS Institute*). Le logiciel utilise la technique des régressions multilinéaires et ANOVA pour faire l'analyse statistique et en examinant les résiduels pour des tendances.

La modélisation et l'exploitation des résultats ont été effectuées par le logiciel *JMP*. Toutes les réponses seront établies selon le modèle du plan de surface de réponse,

Pour deux facteurs sont : 
$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e$$

Notre modèle mathématique associé à un plan de surface de réponse à Cinq facteurs se présente comme suit :

$$\begin{aligned}
 Y = & a_0 + a_1E/C + a_2(G/S) + a_3(F.C) + a_4(Vf) + a_5(SP) + a_{11}(E/C)^2 + a_{12}(E/C * G/S) + a_{13}(E/C * F.C) + \\
 & a_{14}(E/C * Vf) + a_{15}(E/C * Sp) + a_{22}(G/S)^2 + a_{23}(G/S * F.C) + a_{24}(G/S * Vf) + a_{25}(G/S * Sp) + a_{33}(F.C)^2 \\
 & + a_{34}(F.C * Vf) + a_{35}(F.C * Sp) + a_{44}(Vf)^2 + a_{45}(Vf * Sp) + a_{55}(Sp)^2
 \end{aligned}
 \tag{Equ 3.1}$$

Où les coefficients ( $a_i$  et  $a_{ij}$ ) sont les contributions des facteurs et leurs interactions sur les modèles établis. Ces coefficients sont déterminés par des régressions multilinéaires. Ces valeurs représentent la gamme fonctionnant proposée pour étudier l'effet des proportions de mélange sur le comportement du béton étudié.

**4.3 Modèles mathématiques des réponses**

Les modèles des réponses étudiées peuvent être réécrits en équation comme suit :

<b><u>Étalement (cm)</u></b>
$\text{Etal (cm)} = 70,36 + 5,11 * (E/C) + 9,28 *(G/S) + 22,51*(Sp) - 7,69*(E/C)^2 - 5,85*(G/S)^2 - 6,93*(Sp)^2$
<b><u>v-funnel(s)</u></b>
$\text{V-funnel(s)} = 5,65 - 6,87(E/C) + 3,86(G/S) - 1,36(Vf) + 1,89(E/C * F.C) - 2,01(G/S * F.C) + 4,58(G/S * Vf) - 2,10(F.C * Vf) + 2,88(E/C * Sp) - 6,85(G/S * Sp) + 2,59(F.C * Sp) - 1,22(Vf * Sp) + 3,92(E/C)^2 - 2,37(G/S)^2 + 0,45(F.C)^2 + 1,22$
<b><u>J-R int-ext</u></b>
$\text{J-Rint-ext(cm)} = 0,97 - 0,50(F.C) - 2,64(E/C * F.C) - 0,40(E/C * Vf) - 1,87(G/S * Vf) - 1,04(G/S * Sp) - 0,94(Vf * Sp) + 0,52(F.C)^2$
<b><u>J-ring étalement</u></b>
$\text{J-R étal (cm)} = 75,1 + 13,39*(G/S) + 25,28*(Sp) - 6,11*(G/S)^2 - 5,69*(F.C)^2 - 6,24*(Vf)^2 - 12,35*(Sp)^2$
<b><u>Boite en L H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub></u></b>
$\text{Boit-L(H2/H1)} = 0,86 - 0,43(E/C) + 0,11(G/S) + 0,07(F.C) + 0,06(E/C * F.C) + 0,06(F.C * Vf) + 0,42(E/C * Sp) - 0,15(F.C * Sp) + 0,12(Vf * Sp) - 0,05(F.C)^2$
<b><u>Stabilité au tamis (ségrégations)</u></b>
$\text{Segregations(\%)} = 5 + 4,34(E/C) + 4,33(G/S) + 1,33(F.C) + 6,87(Sp) - 3,6 (F.C * Vf) + 1,38 (F.C * Sp) + 2,76(E/C)^2 - 1,29 (G/S)^2 - 2,89(Sp)^2$
<b><u>Masse volumique Kg/m<sup>3</sup></u></b>
$\text{Mv(kg/m}^3\text{)} = 2304,26 + 54,20(G/S) + 22,92(Vf) + 50,52(Sp) - 30,37(E/C)^2$
<b><u>Résistance a la compression 7j et 28j (MPa)</u></b>
$\text{Fc 7j(MPa)} = 32,70 + 4,87(G/S) + 1,57(Vf) + 2,53(Sp) + 1,1(E/C * Vf) + 2,13(FC * Vf) - 1,11(E/C)^2$
$\text{Fc 28j(MPa)} = 39,13 + 5,18(G/S) + 3,27(Sp) + 2,56(Vf) - 1,31(E/C) - 2,34(E/C)^2$
<b><u>La résistance à la flexion 7j et 28j (MPa)</u></b>
$\text{Rf 07j(MPa)} = 5,35 + 0,57(G/S) + 0,28(Vf) - 0,24(E/C * FC) - 0,35(E/C)^2$
$\text{Rf 28j(MPa)} = 6,25 + 0,52(G/S) + 0,39(Vf) + 0,22(F.C) + 0,2(Sp) + 0,29(F.C * Vf) - 0,38(E/C)^2$

#### 4.4 Résumé de l'ajustement

Le résumé de l'ajustement des réponses étudiées sont données dans le tableau suivant :

	V-funnel (s)	L-Box H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	Etalement (cm)	Stabilité au tamis (Ségrégation) (%)	J-ring		M. volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Rc-7j (MPa)	Rc-28j (MPa)	Rf-7j (MPa)	Rf-28j (MPa)
					D <sub>MOY</sub> (cm)	Ji-Je (cm)					
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,9997</b>	<b>0,939</b>	<b>0,845</b>	<b>0,962</b>	<b>0,962</b>	<b>0,946</b>	<b>0,808</b>	<b>0,874</b>	<b>0,688</b>	<b>0,848</b>	<b>0,828</b>
<b>Écart-type résiduel</b>	<b>0,175</b>	<b>0,079</b>	<b>11,244</b>	<b>1,621</b>	<b>1,62</b>	<b>0,514</b>	<b>36,83</b>	<b>2,230</b>	<b>4,470</b>	<b>0,430</b>	<b>0,446</b>
<b>Moyenne de la réponse</b>	<b>8,334</b>	<b>0,777</b>	<b>55,806</b>	<b>6,995</b>	<b>6,995</b>	<b>1,610</b>	<b>2283,14</b>	<b>31,938</b>	<b>37,49</b>	<b>5,035</b>	<b>6,097</b>
<b>sommes pondérées</b>	<b>23</b>	<b>21</b>	<b>31</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>31</b>

Tableau 3. 5:Résumé de l'ajustement

**4.5 Estimations des coefficients :**

L'estimation des différents coefficients et les paramètres des modèles établis sont récapitulés dans le (Tableau 3. 6).

**Tableau 3. 6:** Estimation des coefficients des réponses à (À l'état frais).

Terme	V-funnel (s) R <sup>2</sup> =0,9995		L-Box (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> ) R <sup>2</sup> = 0.939		Etalement (cm) R <sup>2</sup> =0,845		Stab. au tamis (%) R <sup>2</sup> =0,962		J-ring (cm) Dmoy R <sup>2</sup> =0,962		Ji –Je (cm) R <sup>2</sup> =0,946		M.Volumique (kg/m3) R <sup>2</sup> =0,808	
	Estim	P> t	Estim	P> t	Estim	P> t	Estim	P.> t	Estim	P> t	Estim	P> t	Estim	P> t
Constante	5,602	<.0001	0,863	<.0001	70,36	<.0001	4.994	<.0001	75.10	<.0001	0.9707	<.0001	2304,3	<.0001
E/C	-6.902	<.0001	-0.432	<.0001	5.112	<.0454	4.345	<.0001	—	—	NS	—	NS	—
G/S	4.152	<.0001	0.107	0.0006	9.285	0.0007	4.335	<.0001	13.393	<.0005	NS	—	54,198	<.0001
F.C	NS	—	0.073	0.0391	-0.188	0.9384	1.331	0.0078	NS	—	-0.498	0.0028	NS	—
Vf	-1.368	<.0001	NS	—	NS	---	NS	—	NS	—	NS	—	22,923	0.007
SP	0.238	0.0498	NS	—	22.515	<.0001	6.872	<.0001	25.279	<.0008	NS	—	50,520	<.0001
E/CxG/S	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—
E/CxF.C	1.896	<.0001	0.064	0.0391	NS	—	NS	—	NS	—	-2.638	<.0001	NS	—
E/CxVf	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	-0.406	0.0437	NS	0.0415
G/SxF.C	-2.01	<.0001	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—
G/SxVf	4.583	<.0001	NS	—	-6.827	0.0116	NS	—	NS	—	-1.870	0.3277	NS	—
F.CxVf	-2.100	<.0001	0,0597	<.0409	NS	—	-3.600	<.0001	NS	—	NS	—	NS	—
E/CxSP	2.921	<.0001	0,416	<.0001	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—
G/SxSP	-7.131	<.0001	NS	—	NS	—	NS	—	NS	—	-1.043	<.0001	NS	—
F.CxSP	2.59	<.0001	-0.146	0.0052	NS	—	1.388_	0.0227	NS	—	NS	—	NS	—
VfxSP	-1.223	<.0001	0.118	0.0008	NS	—	NS	—	NS	—	-0.943	0.0002	NS	0.0290
E/CxE/C	3.947	<.0001	NS	—	-7.695	0.0106	2.768	0.0003	NS	—	NS	—	-30,37	0.0290
G/SxG/S	-2,375	<.0001	NS	—	-5.855	0.0183	-1.293	0.0288	-6.111	<.0424	NS	—	NS	—
F.CxF.C	0,457	<.0001	-0.052	0.0201	NS	—	NS	—	-5.693	<.0493	0.515	0.1212	NS	—
VfxVf	1.223	<.0001	NS	-----	NS	—	NS	—	-5.991	<.0387	NS	—	NS	—
SPxSP	NS	—	NS	—	-6.926	0.0099	-2.893	0.0002	-12.20	<.0247	NS	—	NS	—

**Tableau 3. 7:** Estimation des coefficients des réponses à (À l'état durci).

Terme	Rc-7j (MPa) R <sup>2</sup> =0,829		Rc-28j (MPa) R <sup>2</sup> =0,688		Rf-7j (MPa) R <sup>2</sup> =0,85		Rf-28j (MPa) R <sup>2</sup> =0,827	
	Estim.	P.> t	Estim.	P.> t	Estim.	P.> t	Estim.	P.> t
<b>Constante</b>	<b>31,938</b>	<b>&lt;.0001</b>	<b>39,13</b>	<b>&lt;.0001</b>	<b>5,346</b>	<b>&lt;.0001</b>	<b>6,25</b>	<b>&lt;.0001</b>
<b>E/C</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>-1.31</b>	<b>0.1860</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>G/S</b>	<b>4,872</b>	<b>&lt;.0001</b>	<b>5,186</b>	<b>&lt;.0001</b>	<b>0,570</b>	<b>0.0005</b>	<b>0,518</b>	<b>&lt;.0001</b>
<b>F.C</b>	<b>2.13</b>	<b>0.0004</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>0,224</b>	<b>0,0285</b>
<b>Vf</b>	<b>1.576</b>	<b>0.0014</b>	<b>2.55</b>	<b>0.0126</b>	<b>0.279</b>	<b>0.0075</b>	<b>0.390</b>	<b>0,0006</b>
<b>SP</b>	<b>2.53</b>	<b>&lt;.0001</b>	<b>3.27</b>	<b>0.0019</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>0,20</b>	<b>0,0027</b>
<b>E/CxG/S</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>-2,386</b>	<b>0,0382</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>E/CxF.C</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>-0.244</b>	<b>0.0372</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>E/CxVf</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>G/SxF.C</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>G/SxVf</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>NS</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>F.C xVf</b>	<b>2.13</b>	<b>0.0004</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>0.290</b>	<b>0,0171</b>
<b>E/CxSP</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>G/SxSP</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>F.C xSP</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>VfxSP</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>E/C x E/C</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>0,345</b>	<b>0.005</b>	<b>-0,389</b>	<b>0,0084</b>
<b>G/SxG/S</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>F.CxF.C</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>VfxVf</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>
<b>SPxSP</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>	<b>NS</b>	<b>—</b>

#### 4.6 Développement des modèles statistiques

La première étape consiste à déterminer les facteurs influents et à développées le modèle quadratique permettant de décrire les valeurs expérimentales. Une analyse statistique de variance permet de dissocier les différents effets étudiés à partir de la variance de la réponse mesurée. La signification statistique de chaque effet est ensuite testée en comparant la variance des effets décrits par le modèle obtenu au moyen de la méthode des moindres carrés, avec une estimation de la

variance résiduelle due aux erreurs  $\epsilon$ . La signification statistique de l'équation du modèle a été évaluée par le test F ANOVA. La signification de chaque coefficient a été déterminée par F-values et p-value. La valeur F(1.70) avec une valeur basse de probabilité ( $P < 0.0001$ ) démontre une signification élevée pour le modèle de régression. La qualité de l'ajustement du modèle a été également vérifiée par le coefficient de corrélation multiple. La valeur du coefficient de corrélation multiple était 0.904, qui a indiqué que cette régression est statistiquement significative et seulement 9.03% de toutes les variations ne sont pas expliqués par le modèle.

Les modèles développés, pour l'ensemble des réponses étudiées, ainsi que leurs coefficients de corrélation et leurs Prob.>|t| sont présentés dans le Tableau 3. 8. Les probabilités inférieures à 0.05 sont souvent considérées adéquates. Par conséquent les paramètres qui ont une probabilité inférieure à 0.05 sont considérés comme paramètres significatifs.

Le Prob. > |t| est la probabilité d'obtenir un plus grand événement statistique, en valeur absolue. Les modèles dérivés ont été établis pour des valeurs de probabilité inférieure à 10 ou limite de confiance de 90 % , qui sont souvent considérés comme des preuves significatives que le paramètre n'est pas nul, c'est à dire que la contribution du paramètre proposé a une influence très importante sur la réponse mesurée . L'importance de chaque facteur sur le modèle de la réponse donnée est étudiée en utilisant le test de signification des effets test de Studentt [65] [66].

Dans ces modèles, l'importance d'un facteur est liée à la valeur absolue de son coefficient. Le signe négatif d'un coefficient signifie que le facteur fait diminuer la réponse.

Les termes des facteurs de ces modèles sont des variable codées est sont calculées comme étant la valeur absolue de la différence entre la valeur réelle et la valeur correspondant aux point centraux divisée par la différence entre les valeurs correspondant à 0 et 1 (le pas), comme montré ci-dessous.

$code(E/C) = \left[ \frac{E/C - 0.55}{0.03} \right]$	$code(G/S) = \left[ \frac{G/S - 0.35}{0.20} \right]$
$code(F.C) = \left[ \frac{F.C - 200}{56} \right]$	$code(Vf\%) = \left[ \frac{Vf\% - 0.35}{0.20} \right]$
$code(Sp\%) = \left[ \frac{Sp\% - 1.5}{0.5} \right]$	

#### 4.7 Analyse de la variance des modèles

L'analyse de la variance permet de voir quelle est la contribution des facteurs à la variabilité de la réponse (Tableau 3. 8).L'importance des modèles établis est évaluée en utilisant le test de distribution de Fisher. Pour chaque modèle, la valeur de F a été comparée à  $F_{\alpha, k, n - k - 1}$ . Valeur de la table Fisher où  $\alpha$  est le degré de liberté, k est le nombre de coefficients inconnus dans le modèle, et n est le nombre des expériences. Les analyses de la variance de chacune des réponses modélisées sont présentées dans le Tableau 3. 8. Pour un intervalle de confiance de 90 %, les Rapport F sont respectivement, pour V-funnel (F0.1, 16, 6), L-Box( $h_2/h_1$ ) (F0.1,9, 11),Etalement (cm),( F0.1 , 6, 24 ) ,Stabilité au tamis (%)( F0.1 , 9 , 14 ) ,J-ring (cm) Dmoy( F0.1 ,6, 15),J-ring  $J_i - J_e$  (cm)(F0.1,7, 13), la masse volumique( $Kg/m^3$ ) (F0.1,4, 26),la résistance à la compression Rc-7jours (MPa)( F0.1 , 2 ,28), la résistance à la compression Rc-28jours (MPa)(F0.1,3, 27), résistance à la flexion à 07 jours (F0.1,3, 27),résistance à la flexion à 28 jours (F0.1,5, 25) On remarque d'après le tableau 3.8 que les rapports F (de Fisher) des réponses V-funnel, L-Box( $h_2/h_1$ ), Etalement (cm),Stabilité au tamis (%),J-ring (cm) Dmoy, la masse volumique( $Kg/m^3$ ) (F0.1,4, 26),la résistance à la compression Rc-7jours (MPa) ( F0.1 , 2 ,28), la résistance à la compression Rc-28jours (MPa) (F0.1,3, 27), résistance à la flexion à 07 jours (F0.1,3, 27),résistance à la flexion à 28joursont largement grands, par contre les réponses de la J-ring  $J_i - J_e$  (cm)sont faibles par rapport aux précédents, mais sont acceptable. Ils sont tous supérieurs à 1, ce qui est confirmé aussi par les faibles valeurs de p-value. Ainsi, la contribution du rapport  $(E/C)^2$ ,  $G/S$ ,  $(G/S)^2$ , $(FC)^2$ pour l'état frais les contrebutions du rapport  $G/S$ , $SP$ , $G/S \cdot V_f$  et  $(E/C)^2$  pour l'état durci ,sont très significatif sur les modèles dérivés.

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

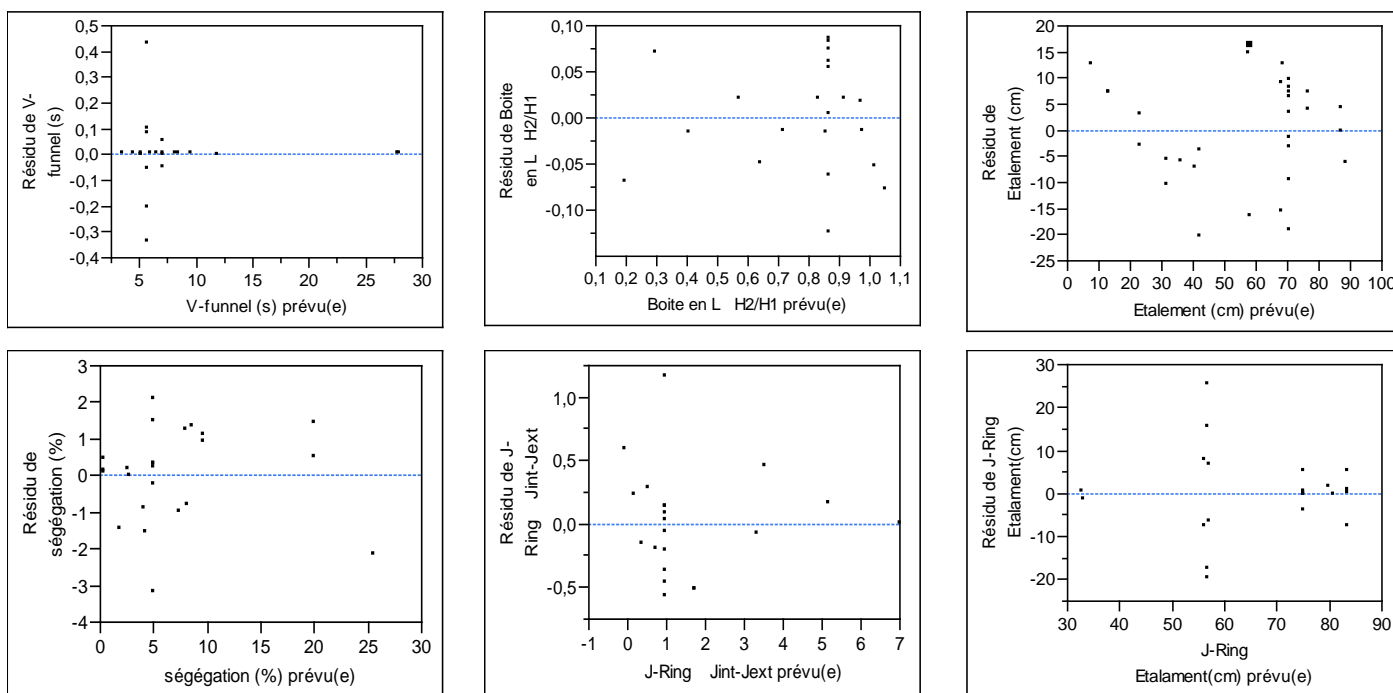
**Tableau 3. 8:** Analyse de la variance des modèles développés (linéaire et quadratiques)

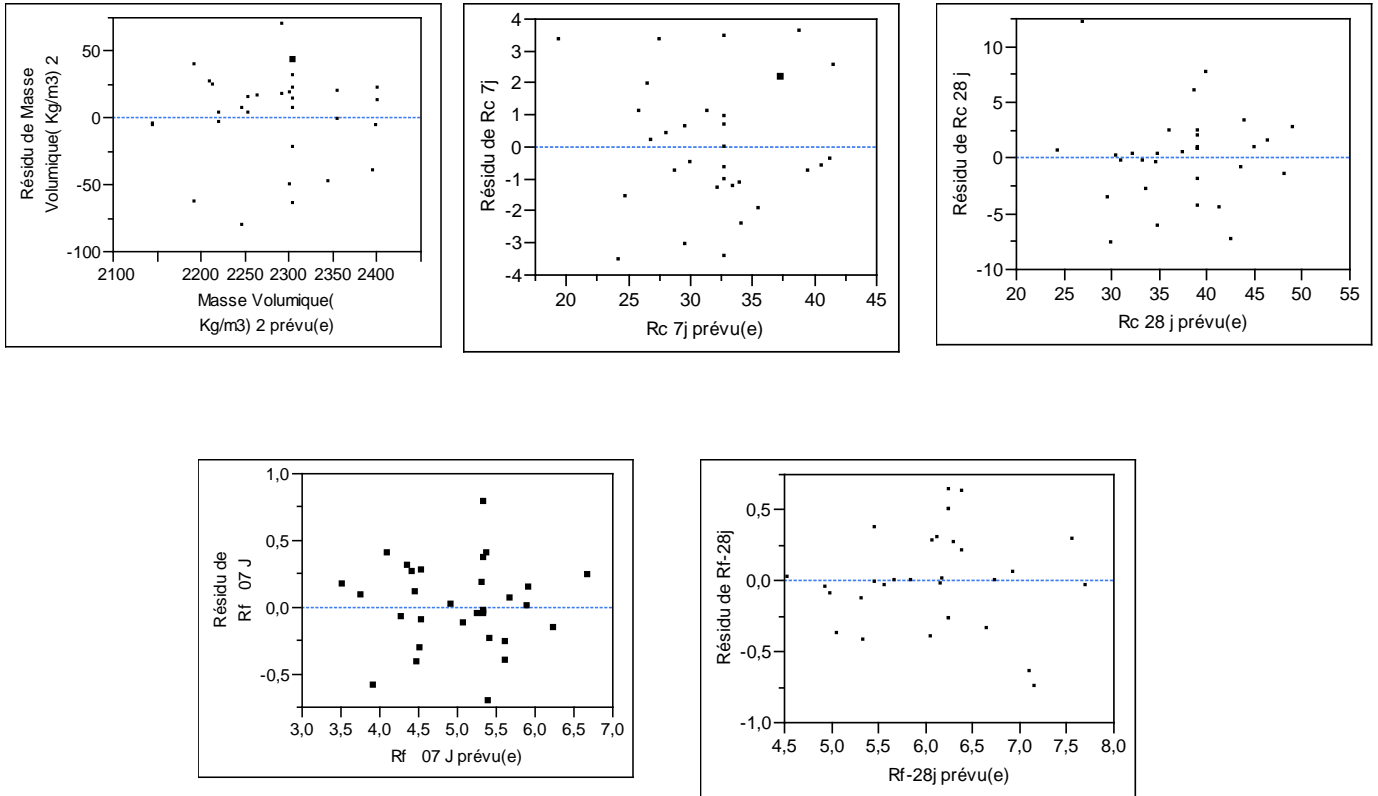
Réponses du variable	Source de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carrémoyen	Rapport F	Prob. > F
V-funnel (s)	Régression	16	908,22	56.76	1843.56	< 0.0001
	Résidus	6	0,185	0.031	-----	-----
	Total	22	908,41	-----	-----	-----
L-Box (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	Régression	9	1,07	0,12	18,99	< 0.0001
	Résidus	11	0,07	0,006	-----	-----
	Total	20	1,138	-----	-----	-----
Etalement (cm)	Régression	6	16574,28	2762,38	21,85	< 0.0001
	Résidus	24	3034,44	126,44	-----	-----
	Total	30	19608,73	-----	-----	-----
Stab. au tamis (%)	Régression	9	937,81	104,20	39,65	< 0.0001
	Résidus	14	36,79	2,628	-----	-----
	Total	23	974,60	-----	-----	-----
J-ring (cm) Dmoy	Régression	6	5015,98	835,99	6,52	0,0015
	Résidus	15	1923,68	128,25	-----	-----
	Total	21	6939,66	-----	-----	-----
Ji –Je (cm)	Régression	7	60,74	8,67	32,78	<,0001
	Résidus	13	3,44	0,26	-----	-----
	Total	20	64,17	-----	-----	-----
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Régression	4	149170,94	37292,7	27,48	<,0001
	Résidus	26	35283,70	1357,1	-----	-----
	Total	30	184454,65	-----	-----	-----
Rc-7j (MPa)	Régression	6	836.94	139,49	27.94	<,0001
	Résidus	24	119.79	4,55	-----	-----
	Total	30	956.73	-----	-----	-----

Réponses du variable	Source de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F	Prob. > F
Rc-28j (MPa)	Régression	5	1108,139	221,628	11,0586	<,0001
	Résidus	25	501,030	20,041	-----	-----
	Total	30	1609,170	-----	-----	-----
Rf-07j (MPa)	Régression	14	16,614	1,18674	6,410	<,0001
	Résidus	16	2,962	0,18513	-----	-----
	Total	30	19,576	-----	-----	-----
Rf-28j (MPa)	Régression	12	17,253	1,437	7,217	<,0001
	Résidus	18	3,586	0,199	-----	-----
	Total	30	20,839	-----	-----	-----

#### 4.8 Analyse des résidus

On porte la valeur des résidus en fonction des réponses prévues (Figure 3. 1). La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues, nous permet d’observer que les points des différentes réponses étudiées semblent répartis au hasard et il n’apparaît pas de structures nettes, en d’autre terme, pas une tendance particulière. Dans ces conditions, on considère qu’il n’y a plus d’information à extraire dans nos résultats. Donc, on peut dire que les modèles issus de l’application de la méthode de plan d’expériences expliquent bien les résultats expérimentaux.





**Figure 3. 1 :** valeurs des résidus en fonction des réponses prévues.

## Chapitre 4

### Exploitation de profileurs iso-réponses et de surfaces

Les modèles mathématiques développés décrivent la signification relative de chaque variable et fournissent des informations clés pour l'optimisation de BSAPF. Ces modèles peuvent aussi être utilisés pour étudier l'influence d'un groupe de variables sur les propriétés du BSAPF à l'état frais et durci.

#### 1 (V-funnel)

Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application, mais ne sont groupés que selon 2 classes [67]

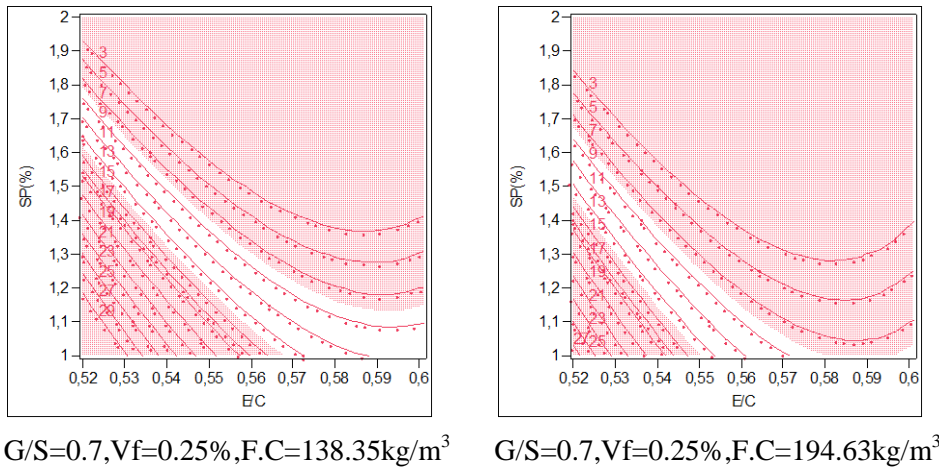
Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10 s.

Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27 s.

Le modèle mathématique développé de V-funnel, représenté par l'équation suivante

$$\begin{aligned} \mathbf{V-funnel(s)} = & 5.60 - 6.90(E/C) + 4.15(G/S) - 1.37(Vf) + 0.24(SP) + 1.89(E/C * F.C) - \\ & 2.01(G/S * F.C) + 4.58(G/S * Vf) - 2.11(F.C * Vf) + 2.92(E/C * Sp) - 7.13(G/S * Sp) + 2.59(F.C * Sp) - \\ & 1.22(Vf * Sp) + 3.92(E/C)^2 - 2.55(G/S)^2 + 0.46(F.C)^2 + 1.23(Vf)^2, \end{aligned}$$

$$\mathbf{R^2=0.99}$$



**Figure 4. 1 :** Iso-réponse de V-funnel en fonction E/C et Sp avec variation de FC(138.35 et 194.63), Vf(0.25%), G/S(0.37 et 0.7)

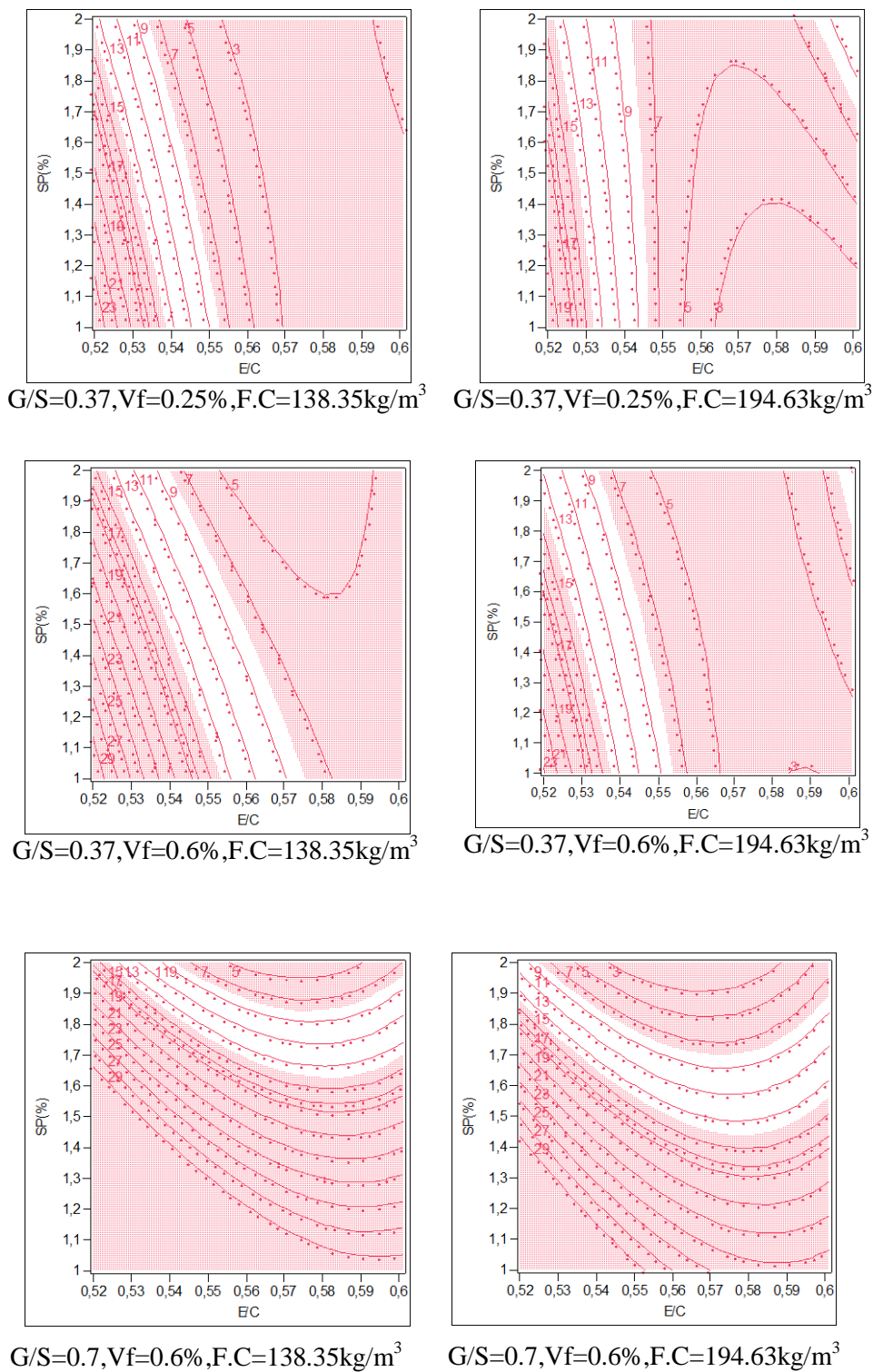
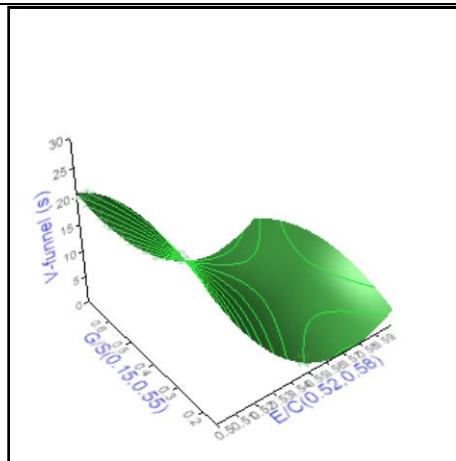


Figure 4. 2 : Iso-réponse de V-funnel en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(138.35 et 194.63), Vf(0.6%), G/S(0.37 et 0.7)



**Figure 4. 3** : Profileur de surface en 3D de V-funnel,(E/C) en fonction (Sp) avec les variations de FC, Vf, G/S

Nous permet de tracer les courbes iso-réponses et les profileurs de surface en 3d, représentées dans la (Figure 4. 1 ;4. 2), montrent l'effet de la variation des paramètres (E/C), (F.C) ,(Vf%) (G/S) et (SP%) sur les réponses du temps d'écoulements, la figure permet de visualiser les différentes courbes et l'effet du facteur E/C, en fonction G/S, nous choisir le dosage de fillers calcaire, le volume de la fibre et le dosage en superplastifiants requise pour une proportion d'addition donnée. Pour faciliter l'interprétation on fixe deux facteurs (E/C=0.55) , (Sp =1.5%) et nous varions les autres facteurs par une simulation de logiciel ,en faisons 100 essais , on délimiter le domaine du temps d'écoulement entre 8 et 14 et on obtient des plusieurs proportions combinées de G/S , Vf et F.C dans la gamme souhaitable des valeurs de temps d'écoulement de(V-funnel).D'après la simulation, on remarque les différents domaines des paramètres des mélanges sont G/S (0,372 à 0,695) , Vf (0.23 à0.6) et FC (80.07 à 194.63) c'est pour E/C =0.55, et Sp=1.5%.

On constate, que les facteurs de G/S et Vf et F.C en général augmentent le temps d'écoulement, c'est à dire la viscosité augmente mais à condition on tenant compte la variation paramètre et leurs interactions

On observe dans le (Tableau 4. 1), que le temps d'écoulement pour E/C = 0.55, Sp= 1.5 % et Vf=0.25% et G/S=(0.37, 0.70) on remarque une augmentation de valeur V-funnel, c'est à dire une augmentation de la viscosité à cause du blocage des granulats. Cependant, l'augmentation de dosage de filler calcaire à 194.63 Kg/m<sup>3</sup>, on remarque une diminution de temps d'écoulement pour G/S=0.7, par contre, lorsqu'on augmente le dosage de fibre métallique on trouve une augmentation de temps d'écoulement avec une augmentation de filler calcaire à 194.63 Kg/m<sup>3</sup>.

En général on peut dire que pour (BSAPF) évidemment l'augmentation du rapport E/C diminue le temps d'écoulement ainsi que le volume de fibres à partir de la valeur Vf=0.25% ,en fonction de

filler calcaire, et le rapport G/S, augmente le temps d'écoulement lorsque Vf, atteindra la valeur 0.7% (Tableau 4. 1).

**Tableau 4. 1 :** Temps d'écoulement avec l'effet de combinaison du dosage FC, Vf, G/S.

V-funnel(s)	F.C (138.35)	F.C (194.63)
	Vf (0.25%), E/C (0.55), Sp(1.5% )	
G/S=0.37	<b>6.36</b>	<b>6.67</b>
G/S=0.70	<b>5.31</b>	<b>2.28</b>
Vf (0.6%), E/C (0.55), Sp(1.5% )		
G/S=0.37	<b>10.45</b>	<b>7.05</b>
G/S=0.70	<b>22.63</b>	<b>15.89</b>

Parmi les 100 essais effectués par simulation et nous sélectionnée 03 essais qui trouve dans l'intervalle des temps d'écoulement recommandée, pour voir les combinaisons des facteurs qui influée sur (**BSAPF**), concernant l'essai de (V-funnel), voir Tableau 4. 2 suivant :

**Tableau 4. 2 :** Prédiction des valeurs de V-Funnel du (BSAPF).

Essais	E/C	G/S	Vf %	Sp %	F.C	V-funnel (s)
01	<b>0,528</b>	0,486	0,340	<b>1,981</b>	183,839	8,094
02	<b>0,555</b>	0,425	0,481	1,322	182,563	8,432
03	0,535	<b>0,235</b>	0,296	1,652	241,515	10,507
05	0,545	0,269	<b>0,159</b>	1,665	199,583	10,210
06	0,539	0,413	<b>0,515</b>	1,388	197,211	11,536
07	0,542	0,388	0,308	<b>1,080</b>	194,359	10,312
09	0,537	0,493	0,394	1,582	<b>136,666</b>	13,738
10	0,534	0,365	0,344	1,527	<b>275,316</b>	10,284

## 2 Boite en L

Nous permet de tracer les courbes iso-réponses et les profileurs de surface en 3d, représentées dans la Figure 3.4, montrent l'effet de la variation des paramètres (E/C), (F.C) , (Vf%) (G/S) et (SP%) sur les réponses boit en L (Tableau 4. 3), nous varions les autre Facteurs par un simulation de logiciel ,en faisons 100 essais et on limite le rapport du valeur ( $H_2/H_1$ ) entre 0.8 et 1 , on obtiennent des plusieurs proportions de G/S ,Vf et F.C ,dans la gamme souhaitable des valeurs du rapport qui permet de donne un image claire du mobilité du **BSAPF** en milieu confiné, après la simulation, en

Chapitre 4 : Exploitation des profileurs iso-réponses et de surfaces

remarque les domaine des différents paramètres des mélanges sont G/S (0 à 0,697) , Vf (0.148 à 0.622%) , FC (158.471 à 264.177) , E/C (0.522 à 0.574), et Sp (0.985 à 1.787% ).

Pour l'essai de boîte L (L-box), le modèle mathématique développé, représenté par l'équation suivante :

$$L\text{-box} = 0.86 - 0.43(E/C) + 0.107(G/S) + 0.07(F.C) + 0.06(E/C * F.C) + 0.06(FC * Vf) + 0.42(E/C * SP) - 0.15(FC * SP) + 0.12(Vf * SP) - 0.05(FC)^2 ; \quad R^2 = 0.939$$

On constate, que les facteurs de G/S et F.C et l'interaction de F.C avec Vf, E/C et F.C, en général l'augmentation du G/S, provoque un risque de blocage ainsi le rapport E/C.

Tableau 4.3 : Prédiction des valeurs de L-Box du (BSAPF).

Essais	E/C	G/S	F.C	Sp %	Vf %	Boite en L H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>
01	<b>0.522</b>	0.388	232.930	<b>1.787</b>	<b>0.148</b>	0.903
02	<b>0.574</b>	0.402	183.462	1.917	0.415	0.845
03	0.533	<b>0.026</b>	181.563	1.474	0.174	<b>0.953</b>
05	0.569	<b>0.697</b>	244.295	1.504	0.233	<b>0.812</b>
06	0.545	0.369	<b>158.471</b>	2.267	0.361	0.938
07	0.562	0.450	<b>264.177</b>	0.762	0.295	0.833
09	0.541	0.363	185.262	<b>0.985</b>	<b>0.622</b>	0.884

Tableau 4.4 : Rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> et l'effet de combinaison du dosage FC, Vf, G/S.

H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> %	F.C (160)	F.C (260)
	Vf (0.15%), E/C (0.55), Sp(1.5% )	
G/S=0	<b>63.8 %</b>	<b>63%</b>
G/S=0.70	<b>101%</b>	<b>100%</b>
Vf (0.6%), E/C (0.55), Sp(1.5% )		
G/S=0	<b>52.27%</b>	<b>77.41%</b>
G/S=0.70	<b>91.91%</b>	<b>115%</b>

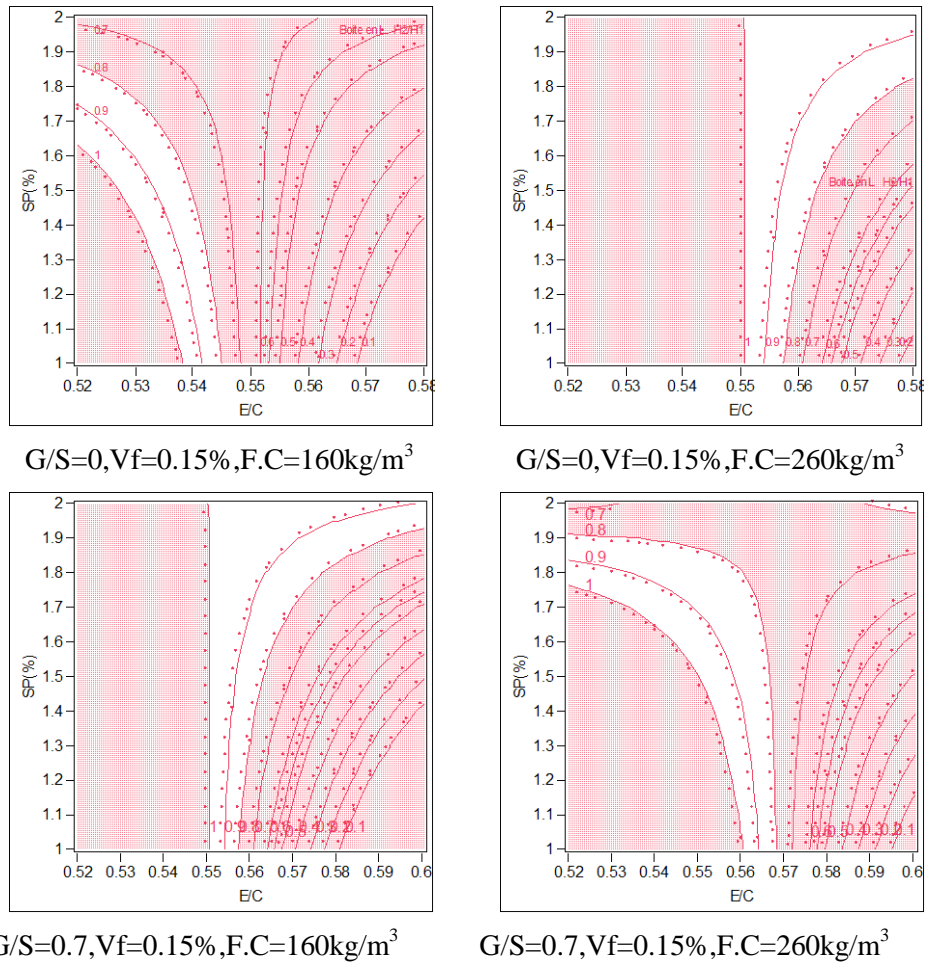


Figure 4. 4 : Iso-réponse de L-Boxe en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(160,260), Vf(0.15%), G/S(0 , 0.7).

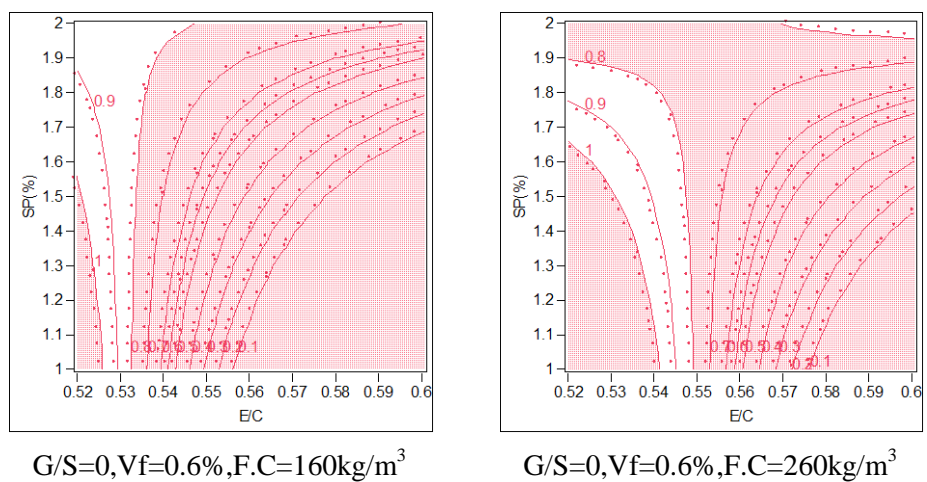
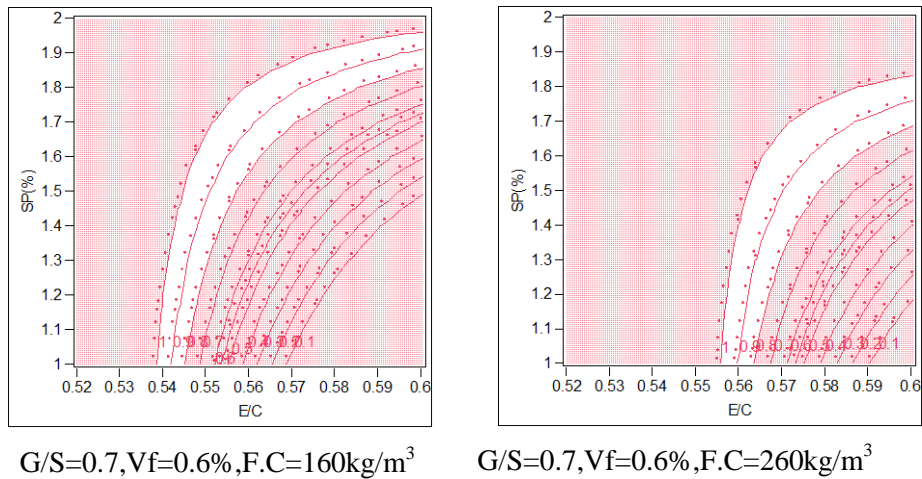
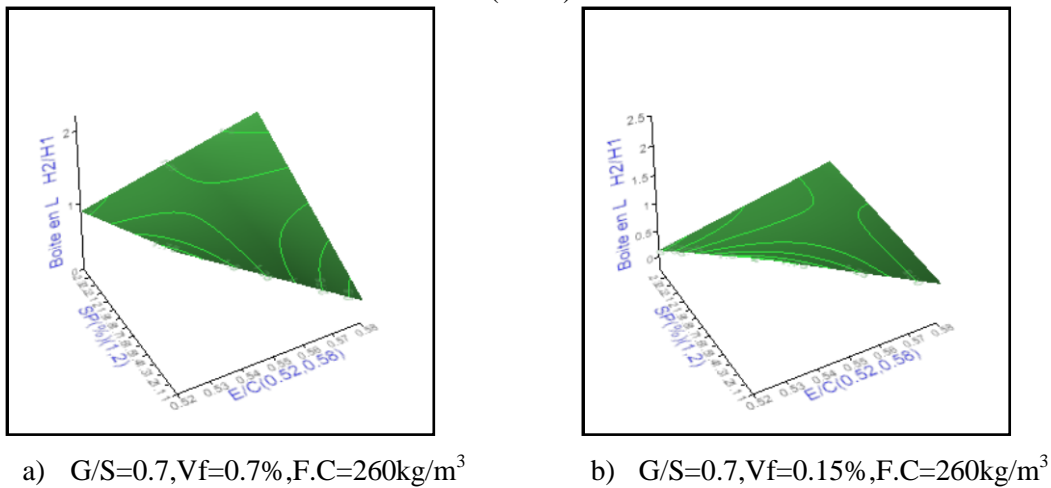


Figure 4. 5 : Iso-réponse de L-Boxe en fonction E/Cet Sp avec variation de FC(160 ,260), Vf(0.6%), G/S(0 et 0.7).



**Figure 4. 6 :** Iso-réponse de L-Boxe en fonction E/C Sp avec variation de FC(160 à260), Vf(0.6%), G/S(0à0.7).



**Figure 4. 7 :** Profileur de surface en 3D de L-Boxe, (E/C) en fonction (Sp) avec les variations de FC, Vf, G/S

Les courbes iso-réponses représentées dans les (Figure 4. 4 ;Figure 4. 5 Figure 4. 6), montrent l'effet de la variation des paramètres (E/C) et (FC) et (G/S) sur la réponse (L-Box), et qui permet de visualiser les effets du facteur eau/ciment, et de choisir le dosage en fillers calcaire, requise pour une proportion d'addition donnée. Comme attendu, le facteur (E/C) a un effet négatif sur la réponse. Les facteurs (G/S) et (FC) sont précédés d'un signe positif, donc une augmentation de leurs valeurs entraînent une augmentation de la valeur du (L-Box) c'est à dire, abaissement le risque du blocage et inversement. D'autre part, l'augmentation du dosage en fillers calcaire (FC) à un effet quadratique sur la réponse L-Boxe dans le domaine d'étude. Les courbes iso-réponses de L-Boxe en fonction du E/C, SP, FC, G/S et Vf présenté dans les (Figure 4. 4 ;Figure 4. 5

Figure 4. 6). Par la suite nous remplace les valeurs minimum et maximum des différents facteurs et faire les combinaisons pour comprendre l'effet des ce dernier sur la réponse, tout ça à l'aide du logiciel JMP. Bien sur les valeurs de  $H_2/H_1$ , réellement ne dépasse pas 100%, la simulation prouve que l'augmentation du dosage de G/S en fonction de FC donne ces résultats.

### 3 Étalement.

A l'aide de logiciel et pour faciliter le traitement des résultats et après la simulation, on remarque que les données des différents paramètres des mélanges sont E/C (0.55 à 0.582), G/S (0.30 à 0,60), Sp(1.5% à 2%) et FC(185 à 265), Par la suite nous remplaçons les valeurs minimums et maximums des différents facteurs, à l'aide du logiciel on peut comprendre l'effet de ce dernier sur la réponse de l'étalement du BSAPF, (

Tableau 4. 5 Tableau 4. 6).

Le modèle mathématique développé, représenté par l'équation suivante :

$$Etalement (cm) = 70,36 + 5.11 * (E/C) + 9.28 * (G/S) - 0.19 * (FC) + 22.51 * (Sp) - 7.69 * (E/C)^2 - 5.85 * (G/S)^2 - 6.93 * (Sp)^2; \quad R^2 = 0.845$$

**Tableau 4. 5 :** Valeurs d'étalement et l'effet de l'interaction du dosage FC, G/S en fonction du (E/C, Sp).

Étalement (cm)	F.C (185 kg/m <sup>3</sup> )	F.C (265 kg/m <sup>3</sup> )
	E/C (0.55), Sp(1.5% )	
G/S=0.30	<b>69.66</b>	<b>65.51</b>
G/S=0.60	<b>72.87</b>	<b>68.46</b>

**Tableau 4. 6 :** Valeurs d'étalement et l'effet de l'interaction du dosage FC, G/S en fonction du (E/C et Sp).

Étalement (cm)	F.C (185 kg/m <sup>3</sup> )	F.C (265 kg/m <sup>3</sup> )
	E/C (0.58), Sp(2% )	
G/S=0.30	<b>82.72</b>	<b>78.57</b>
G/S=0.60	<b>87.87</b>	<b>83.72</b>

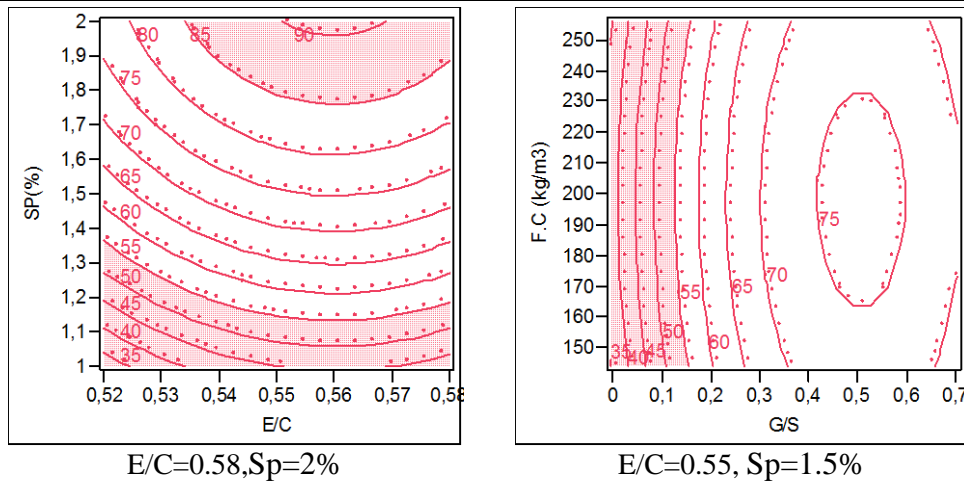


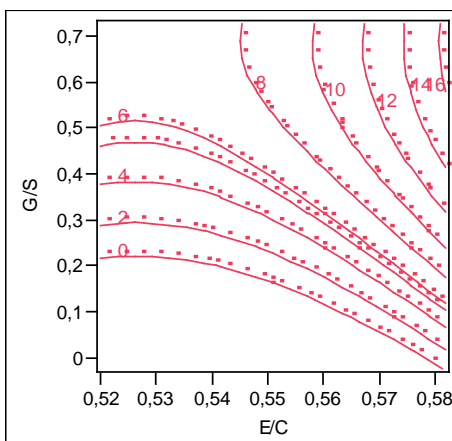
Figure 4. 8: Courbes iso-réponses d'étalement de BSAPF

D'après les courbes (Tableau 4. 6), on constate clairement que l'augmentation de la quantité du gravier donne un bon résultat d'ouvrabilité du béton de sable, surtout que le dosage du filaire calcaire prend la valeur minimale. Comme prévu dans le Tableau 4. 6, autre par l'effet de l'augmentation du F.C déminé légèrement l'étalement du BSAPF, Voire courbes iso-réponse Figure 4. 8.

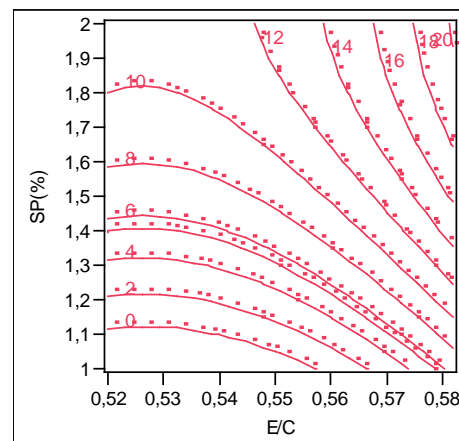
#### 4 Stabilité au tamis

Le modèle mathématique développé, représenté par l'équation suivante :

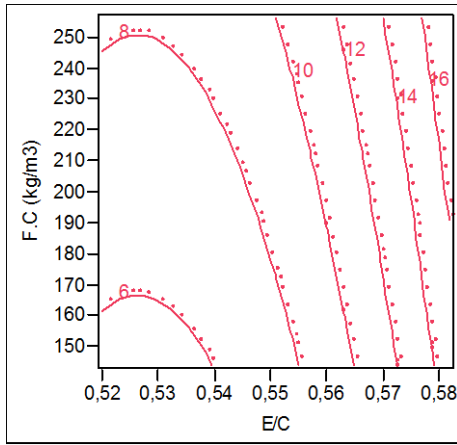
$$\text{Ségrégations(\%)} = 5 + 4.34(E/C) + 4.33(G/S) + 1.33(F.C) + 6.87(Sp) - 3.6(F.C * Vf) + 1.38(F.C * Sp) + 2.76(E/C)^2 - 1.29(G/S)^2 - 2.89(Sp)^2, \text{ avec } R^2 = 0.962$$



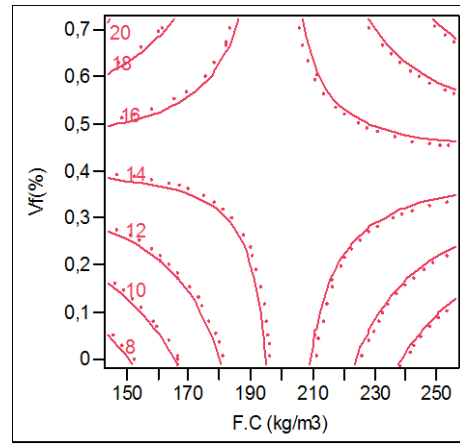
Courbe de stabilité au tamis (G/S en fonction E/C)



Courbe de stabilité au tamis (SPen fonction E/C)

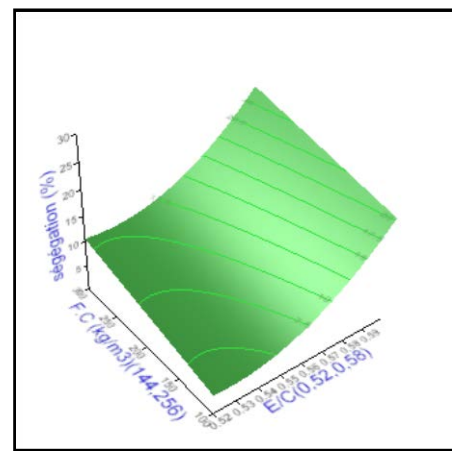
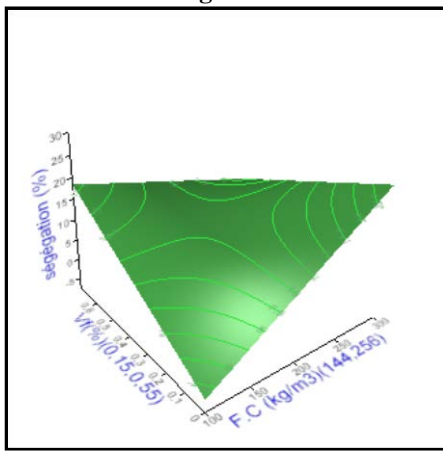


Courbe de stabilité au tamis (F.C en fonction E/C)



Courbe de stabilité au tamis (F.C en fonction Vf)

**Figure 4. 9:** Courbes iso-réponses de la stabilité au tamis du BSAPF



**Figure 4. 10:** Les courbes des profileurs d'iso-réponses 3D, et les surfaces de Stabilité au tamis (%)

Le modèle prouve que les facteurs les plus influents sur la stabilité mesurée par le tamis sont le rapport E/C, le dosage du superplastifiant et le rapport G/S, d'après la (

Figure 4. 9), on remarque que le pourcentage de laitance augmente en fonction de l'augmentation du rapport E/C et/ou l'augmentation du dosage du SP, ainsi que le rapport G/S.

Autre par l'effet de l'augmentation du F.C augmenté légèrement la ségrégation en fonction de l'augmentation de E/C (

Figure 4. 9).

## 5 J-Ring Étalement

Pour cet essai même principe que l'essai au cône, sauf que le béton s'écoule au travers des barres d'armatures, Le but est d'évaluer sa tendance au phénomène de blocage en milieu confinée soit par le gravier, les fibres ou le mélange et qui permettent de qualifier la capacité de passage du béton.

Le modèle mathématique développé, représenté par l'équation suivante:

$$\mathbf{J-R\text{-étalement (cm)} = 75.1 + 13.39(G/S) + 25.28(Sp) - 6.11(G/S)^2 - 5.69(F.C)^2 - 6.24(Vf)^2 - 12.35*(Sp)^2}$$

$$R^2=0,962$$

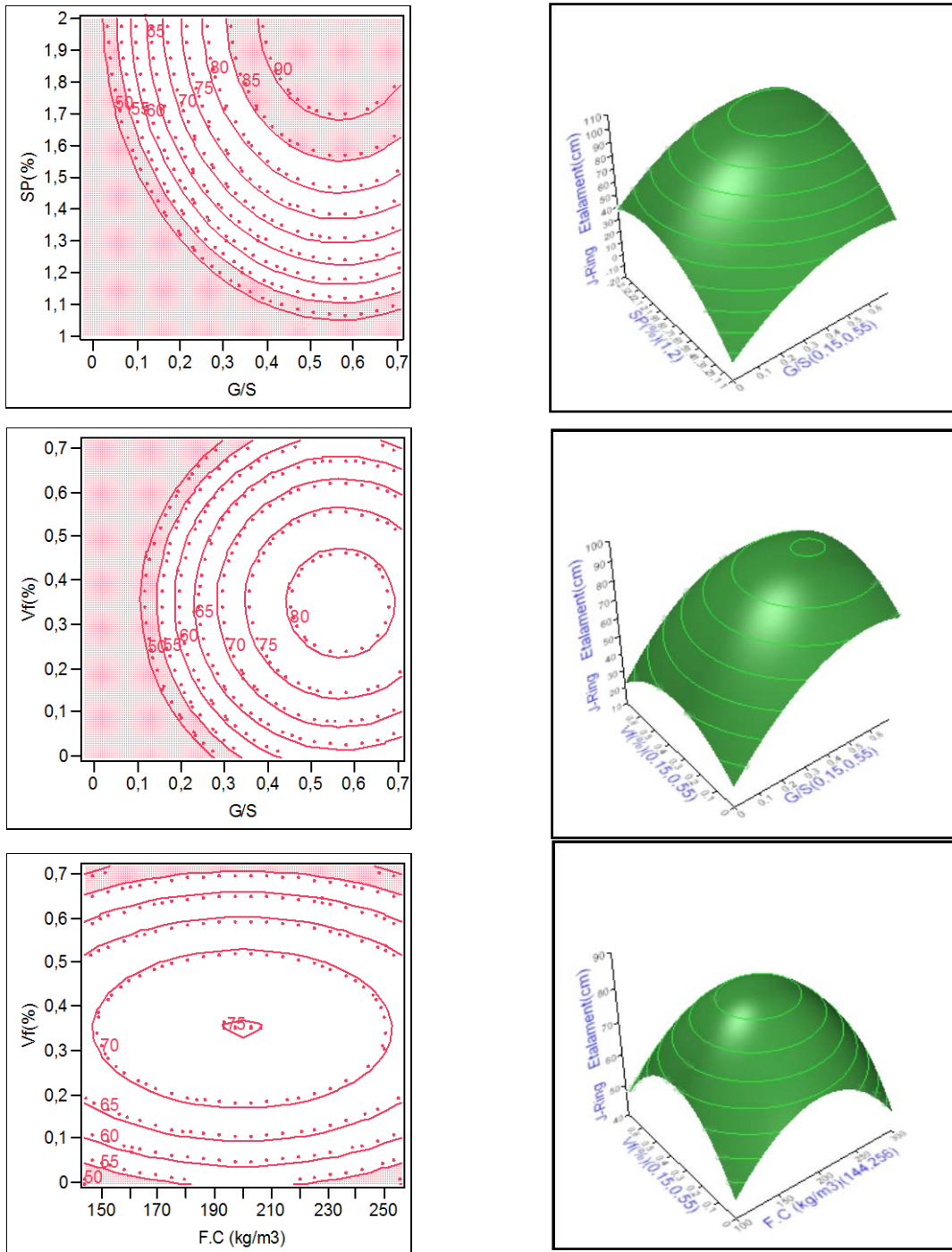


Figure 4. 11: Courbes iso-réponses de la réponse d'Étalement (cm) de J-Ring.

D'après la Figure 4. 11, on constate que la valeur d'étalement du J-Ring diminue en fonction de l'augmentation du rapport  $G/S$  à partir de la valeur  $G/S=0.55$  et  $FC=200 \text{ Kg/m}^3$ , ainsi que l'augmentation dosage de fibre a partir de  $(Vf\%) = 0.35$  va diminuer la valeur étalement du J-Ring . Par contre, l'augmentation de dosage du SP augmente (Ji-Je).

### 6 J-Ring ( $J_{int}-J_{ext}$ )

Le modèle mathématique développé de J-Ring ( $J_{int}-J_{ext}$ ), représenté par l'équation suivante

$$J_{int-ext}(cm) = 0.97 - 0.50(F.C) - 2.64(E/C * F.C) - 0.40(E/C * Vf) - 1.87(G/S * Vf) - 1.04(G/S * Sp) - 0.94(Vf * Sp) + 0.52(F.C)^2 \quad \text{avec } R^2 = 0,946.$$

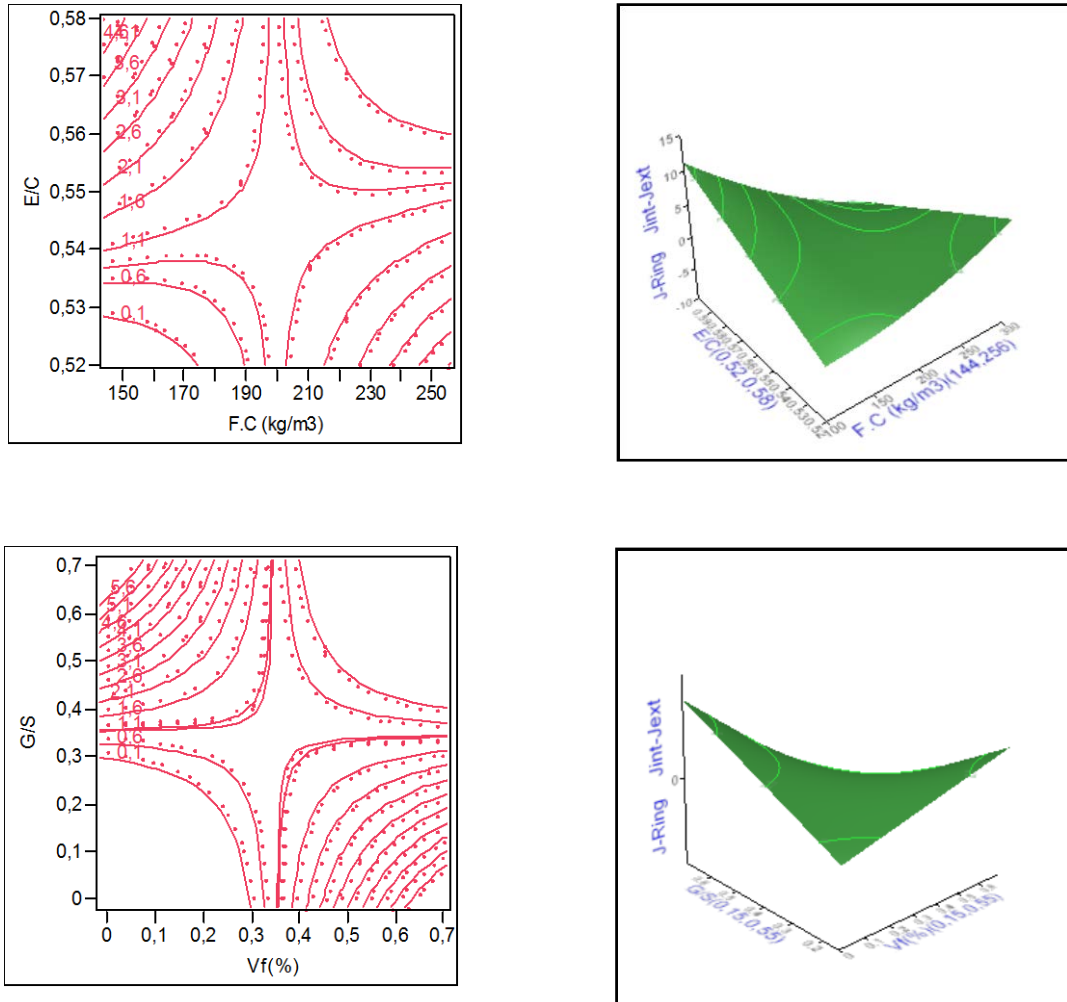


Figure 4. 12: Courbes iso-réponses de la réponse de J-Ring ( $J_{int}-J_{ext}$ ).

D'après la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, on constate que les valeurs de ( $J_{int}-J_{ext}$ ) diminué en fonction de l'augmentation du rapport E/C et/ou de l'interaction de dosage du SP pare ( $G/S$ ,  $Vf$ ) et l'interaction de E/C avec ( $FC$ ,  $Vf$ ). Par contre, l'augmentation de dosage du filler calcaire à partir du dosage  $210 \text{ Kg/m}^3$ , augmente la valeur du ( $J_{int}-J_{ext}$ ).

### 7 Masse volumique

Le modèle mathématique développé de masse volumique  $\text{Kg/m}^3$ , représenté par l'équation suivante :  $Mv (\text{kg/m}^3) = 2304.26 + 54.20(G/S) + 22.92(Vf) + 50.52(Sp) - 30.37(E/C)^2$ ,  $R^2 = 0.808$

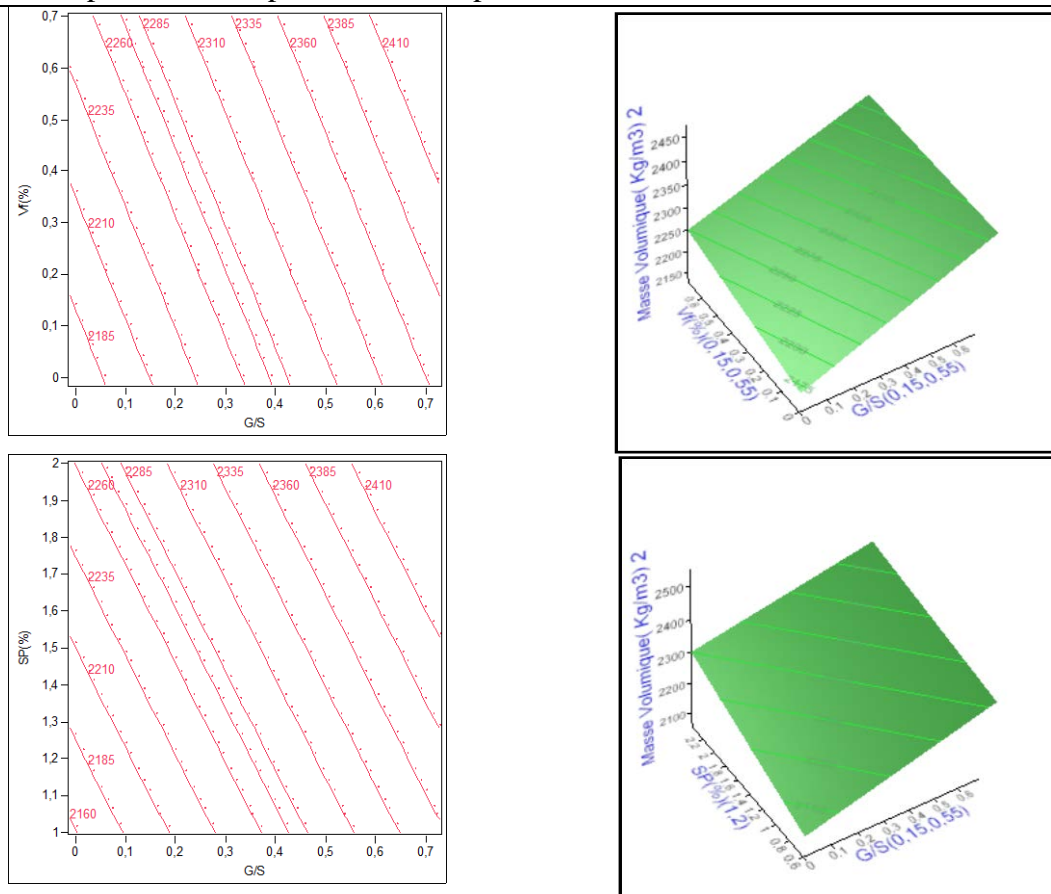


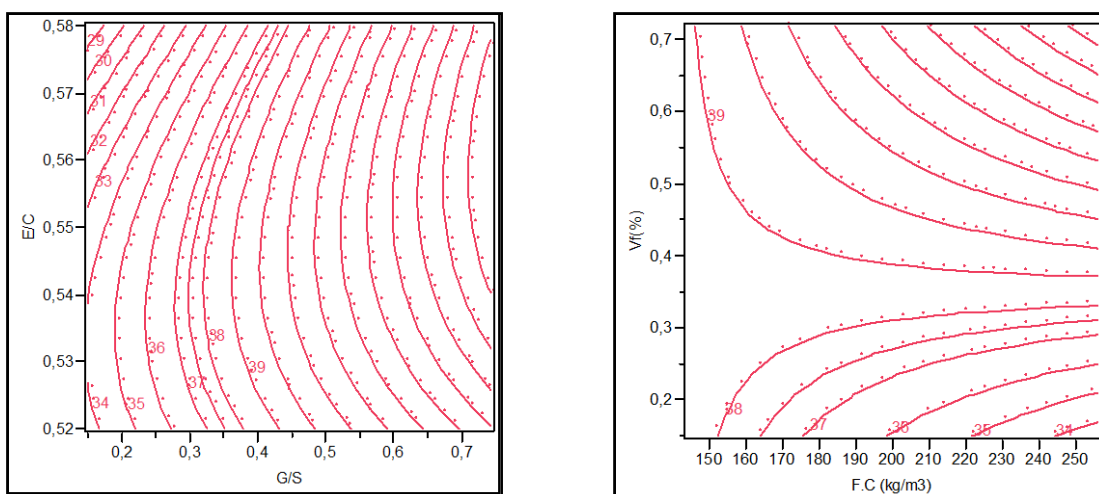
Figure 4. 13: Courbes iso-réponses de la réponse de la masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>).

La Figure 4. 13, montre que les paramètres les plus influents sur la masse volumique sont le rapport G/S, le dosage de la fibre métallique Vf, et superplastifiant SP, d’après cette figure on remarque que la masse volumique augmente en fonction de l’augmentation du rapport G/S et/ou l’augmentation du dosage du Vf.

### 8 Résistance à la compression Rc28 Jours.

Le modèle mathématique développé, représenté par l’équation suivante :

$$F_c 28j(\text{MPa}) = 39.13 + 5.18(G/S) + 3.27(Sp) + 2.56(Vf) - 1.31(E/C) - 2.34(E/C)^2 ; R^2 = 0.688$$



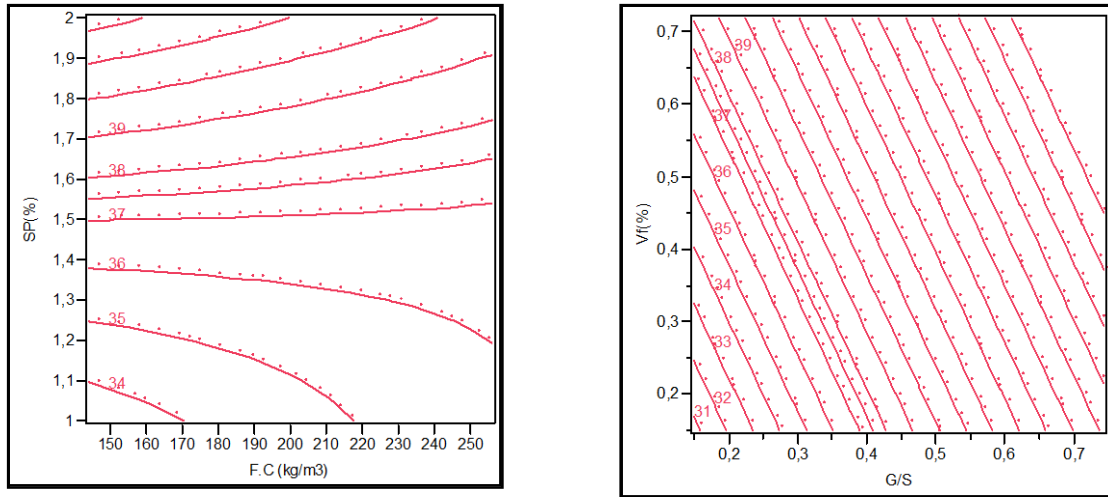


Figure 4. 14: Courbes iso-réponses de la réponse de la résistance à la compression, Rc28 Jours(Mpa).

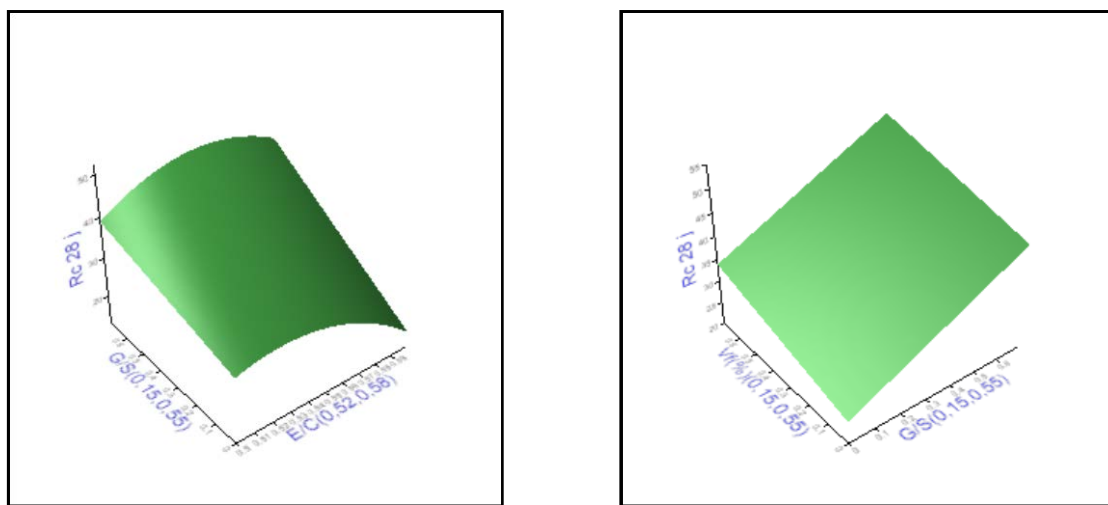


Figure 4. 15: Courbes iso-réponses en 3D de la réponse de la résistance mécanique à la compression à 28j.

D’après la (Figure 4. 14), on constate que la résistance mécanique à la compression diminue avec l’augmentation du rapport E/C et /ou le de dosage du FC. On constate aussi le Vf augmente légèrement la résistance mécanique à la compression de 28 jours, jusqu’à 6.54 %,

On remarque le paramètre le plus influant sur l’augmentation de la résistance mécanique à la compression BSAPF, c’est le rapport G/S, à une majoration de 13%.

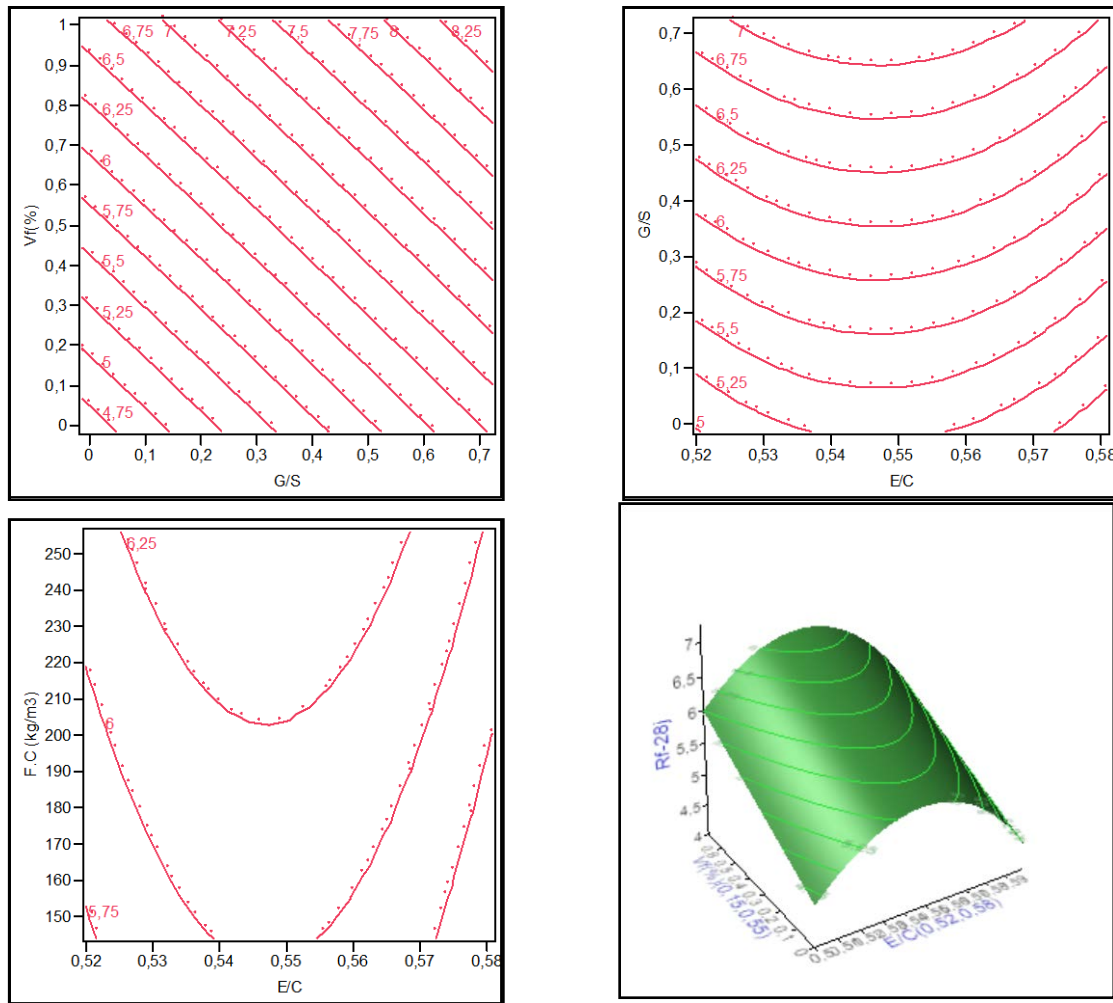
### 9 Résistance à la flexion Rf28 Jours.

Le modèle mathématique développé, représenté par l’équation suivante :

$$Rf\ 28j(MPa) = 6.25 + 0.52(G/S) + 0.39(Vf) + 0.22(F.C) + 0.2(SP) + 0.29(F.C * Vf) - 0.38(E/C)^2,$$

$$R^2 = 0.827$$

Les courbes Les courbes des profileurs d’iso-réponses et les profileurs de surfaces des Résistances à flexions Rf 28 Jours, voir les figures au dessous :



**Figure 4. 16:**Courbes iso-réponses de la réponse de la résistance à la flexion,Rf 28 jours.

D'après les courbes (Figure 4. 16), on constate clairement que les paramètres les plus influent sur l'augmentation de la résistance à la flexion du BSAPF, c'est le rapport G/S et Vf ainsi que FC jusqu'à 8,32%,6,24% et 3,52% respectivement ,et avec les interactions entre les paramètres on remarque que l'augmentations de la résistance à la flexion elle est dans un domaine fiable lorsque le rapport est prise  $E/C=(0.54\text{à}0.55)$ , en fonctions par les paramètres G/S, Vf et FC les plus influents.

## Conclusions générales et perspectives

Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre de plusieurs projets de recherche visant à valoriser les sables locaux dans le secteur de construction en Algérie. L'objectif du présent travail était de formuler un béton de sable auto-plaçants fibré (BSAPF), et de comprendre les rôles joués par ses différents constituants et leurs variations sur les propriétés à l'état frais et durci et de mettre en évidence les éventuelles interactivités entre ces constituants.

Les bétons de sable représentent une solution face à la pénurie des ressources en gros granulats, notamment dans les régions sud de l'Algérie. Les particularités des bétons de sable par rapport aux bétons traditionnels, notamment le volume élevé en pâte, la simple mise en place et de l'absence ou la limitation de dosage des granulats, constituent un atout important lorsque, en plus, on peut les fluidifier afin d'améliorer certaines performances. C'est ainsi que c'est développé, récemment, à travers le monde entier, la technologie des bétons auto-plaçants, technologie à laquelle le concept des bétons de sable répond parfaitement.

Ce travail, avait pour objectifs, de donner une méthodologie pour optimiser la formulation des BAPF à base des matériaux locaux. Le premier objectif était d'évaluer les conséquences potentielles à la présence des variations dans les paramètres composent de nos béton à savoir les rapports G/S, E/C, les fillers calcaires l'introduction des fibres métallique et la présence du SP en mêmes temps.

Afin d'éviter une étude paramétrique, qui ne représente qu'une démarche classique longue et montre des limitations dans la compréhension des rôles de chaque constituant entrant dans la composition des BSAPF ainsi que leurs interactions, nous avons utilisé une approche statistique basée sur les plans d'expériences.

Grâce au logiciel JMP®, qui est particulièrement bien adapté pour la construction et l'analyse des plans d'expériences, nous avons pu analyser et interpréter les résultats trouvés dans notre travail.

La méthode des plans d'expériences c'est avérée très utile dans notre cas, où nous avons utilisé un plan de surface de réponse de 5 facteurs : le rapport G/S, dosage de filler calcaire FC, dosage de superplastifiant SP, rapport eau/ciment E/C, et le dosage de fibre métallique ondulée. Le sable utilisée ont été mélangé de 20% de sable dunaire SD, et 80% de sable alluvionnaire SA. L'application de ce plan a nécessité la détermination d'un domaine expérimental autour d'une

## Conclusions générales et perspectives

---

composition centrale, en définissant les niveaux hauts et bas de chaque facteur et a conduit à la réalisation de 31 compositions.

Les résultats montrent que les modèles ajustés sont de bonnes qualités et donnent les informations suivantes concernant les effets de chacun des paramètres considérés. Les résultats obtenus montrent que :

- L'effet le plus dominant sur les propriétés des BSAPF sur la capacité de remplissage est celui des rapports G/S et E/C, ainsi que du dosage de SP.
- Une augmentation de la fluidité des BSAPF lorsque le rapport G/S et E/C, et l'interaction de FC avec E/C, et ou le dosage du SP augmentent.
- Une augmentation de l'ouvrabilité des BSAPF (diminution du temps d'écoulement au V-funnel) lorsque E/C et/ou le dosage du SP et le rapport de G/S augmentent.
- Une amélioration de la capacité de passage des BSAPF par l'augmentation de dosage du filler calcaire a partir de la valeur  $FC=200\text{Kg/m}^3$  et  $G/S=0.55$  et  $Vf\%=0.35$ . Ainsi qu'une diminution du (Ji-Je) et une augmentation du rapport  $H_2/H_1$  du L-box), lorsque E/C et/ou le dosage du SP augmentent et l'interaction de dosage du SP avec (G/S et Vf), et de E/C avec (FC et Vf).
- Une diminution de la stabilité au tamis des BAP par l'augmentation du rapport E/C et/ou de dosage du SP et l'augmentation de Vf
- Une augmentation de la résistance mécanique à la compression du BSAPF à 28 jours,

Jusqu'à 6.54 % par l'augmentation du rapport G/S et SP.

- Une augmentation de la résistance mécanique à la flexion du BSAPF à 28 jours, jusqu'à 8,32%, 6,24% et 3,52% par l'augmentation des paramètres les plus influant à savoir le rapport G/S et Vf ainsi que FC respectivement.

A l'aide des graphes iso-réponses, qui traduisent en courbes les modèles mathématiques trouvés, nous n'avons que choisir les propriétés visées du BSAP, pour en définir par la suite les valeurs approximatives des paramètres de formulation appropriés.

Les résultats montrent que les pluparts des compositions testées répondent aux exigences d'ouvrabilité données par l'AFGC [62].

Cette étude reste bien sûr limitée au domaine expérimental bien déterminé, et des matériaux locaux utilisés à savoir le gravier, le sable ainsi que les fibres, dans notre cas.

## Conclusions générales et perspectives

---

De nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement des bétons auto-plaçants fibré en milieu confiné, une méthodologie pratique de formulation devra être établie, permettant à l'ingénieur de fabriquer un tel béton, à partir de données de base sur les matériaux locaux. En fin, ces modèles peuvent être développés et améliorés davantage.

Des paramètres considéré comme importants dans la formulation des bétons à savoir la nature, la ou la forme des fibres et leurs orientation peuvent influencer sur les propriétés à l'état frais et durci et la durabilité des béton auto-plaçants, constituant des points essentiels et leurs réponses restent intéressants à exploiter à l'avenir.

## Bibliographie

- [1] Boulekbache B. Hamrat M. Chemrouk M. and Amziane S., *Flowability of fibre reinforced concrete*, 2010.
- [2] Naaman, A.E., 2006. *Fibre Reinforced Concrete- State of Progress at the Edge of the New*. 2006.
- [3] SABLOCRETE., (1994), *Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation*, *Projet National de Recherche et Développement, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et*.
- [4] Domone, P. L., and Jin, J, "*Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete*, *Proceedings of the First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete*. (1999).
- [5] V. K. Bui, D. Montgomery, I. Hinczak, and K. Turner, *Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete*, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 9, September 2002, Pages 1489-1496.
- [6] A. e. al., Aïtcin et al., *L'interaction ciment / superplastifiant. Cas des polysulfonates*, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, Juillet-Août 2001, n° 233, pp 87-98..
- [7] J. Baron et J.P. Ollivier. *Les bétons, Bases et données pour leur formulation*. Eyrolles, 1996..
- [8] Shindoh et Matsuoka, *Development of combination type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods*, *Journal of Advanced Concrete technology*, 2003, vol 1, n°1, pp 26-36..
- [9] Jolicoeur et Simard, *Chemical admixture-Cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts*, *Cement and Concrete Research*, 1998, vol 20, pp 87-101..
- [10] Flatt et Houst, *A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizer*, *Cement and Concrete Research*, 2001, vol 31, pp 1169-1176..
- [11] Yen et al., *Flow behaviour of high strength high-performance concrete, cement and concrete composites*, 1999, vol 21, pp 413-424..
- [12] Golaszewski, Swabowski, *Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars*, *Cement and Concrete Research*, 2004, vol 34, pp 235-248..
- [13] Sugamata, et al., *A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers*, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1999, vol 21, pp 7-14..
- [14] Jin, *Properties of mortar for self-compacting concrete*, *PhD thesis de l'Université de Londres*,

2002,398 pages..

- [15] *Laetitia D'aloia Schwartzentruber et al., Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC), Cement and concrete research, 36 (2006),pp.1203–1213.*
- [16] *Hsu et al., Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability, cement and concrete composites, 1999, vol 21, pp 425-430..*
- [17] *Khayat, Effect of antiwashout properties, admixt I A.C.I.als Materijournal , vol 92,N°2, pp 164-171..*
- [18] *P. Billberg, “Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration”, Proceedings of 2 Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001..*
- [19] *P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul and T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste, Construction and Building Materials Volume 21, Issue 7, July 2007, Pages 1534-1541.*
- [20] *E. Mnahoncakova, M. Pavlikova, S. Grzeszczyk, P. Rovnanikova, R. Cerny, Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers, Construction and Building Materials 22 (2008) 1594–1600.*
- [21] *W. ZHU P.J.M. BARTOS, “Permeation properties of self-compacting concrete ”, Cement and Concrete Research, 33, pp. 921-926, 2003..*
- [22] *S. Assié, DURABILITE DES BETONS AUTOPLAÇANTS, thèse de doctorat, L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 2004.*
- [23] *P. Billberg, “Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration”, Proceedings of 2 Tokyo Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001..*
- [24] *M. Lechemi, K.M.A. Hossain, V. Lambros, N. Bouzoubaâ « Development of cost-effective self consolidating concrete incorporating fly ash, slag cement, or viscosity-modifying admixtures », ACI Materials journal, pp 419-425, Sept-Oct 2003..*
- [25] *J.C .GIBBS. and W. ZHU, “ Strength of hardened self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède,pp. 199-209, 13-15 septembre 1999..*
- [26] *M. Sonebi et P.J.M Bartos, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999..*
- [27] *M. Nehdi, M. Rahman, Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in*

## Bibliographie

---

- dispersed cement-based materials*”, *Cement and concrete Research* 30(10), 2000, pp. 1663-1669..
- [28] SHAH S P, RANGAN B V. "Fibre reinforced concrete properties", *journal American Concrete Institute*. U.S.A, 1971, vol. Proceeding. Vol . 68.
- [29] FRITIH Youcef., (2009), *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France..
- [30] EDINGTON J, HANNANT D J WILLIAM R I T., (1986), *Steel fibers reinforced concrete*, G. B. Building..
- [31] BOURAS R, KACI S, et ROTH J C., (2006), *Approche théorique et expérimentale du comportement rhéologique des bétons de fibres métalliques à l'état frais*, Vol. 9, pp 22-27..
- [32] MASMOUDI Mounira., (2008), *Amélioration des caractéristiques mécaniques du béton et du mortier par renforcement en fibres d'acier*, Mémoire de magister, université de Biskra, Algérie..
- [33] CHERAIT Y, NAFA Z., (2007), *Eléments de matériaux de construction et essais*, Collection : le livre de génie civil, Direction de la publication universitaire de Guelma..
- [34] SERNA ROS P., (1984), *Étude de Contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement*, Thèse Doct. Ing : Ecole national des Ponts et Chaussées, Paris, 77p..
- [35] ROSSI P, HARROUCHE N, BELLOC A., (1989), *Méthode de composition des bétons de fibres métalliques*, *Annales ITBTP*, n°475, Série : Béton 266..
- [36] Saloua Melais\*, Fatma Zohra Melais & Djamel Achoura. "Influence de la nature et du dosage en fibres sur le comportement physicomécanique". 2015.
- [37] Tangtermsirikel s shindoh t sakamoto g. mapsuka. Y . « *development of super workable concrete*..
- [38] S. T., *Les Bétons Autonivelants* », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995. 1995.
- [39] B. Tayeb, B. M. Mohammed, and G. Zoubida, *ETUDE DE LA SEGREGABILITE DES BAP PAR L'UTILISATION DE L'APPROCHE DES PLANS D'EXPERIENCE*. 2013.
- [40] DE LARRAD F .ET LE ROY R ., », *Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des béton a haut performance* », *Matériaux et Construction* ,25 pp ;464-475,1992 ..

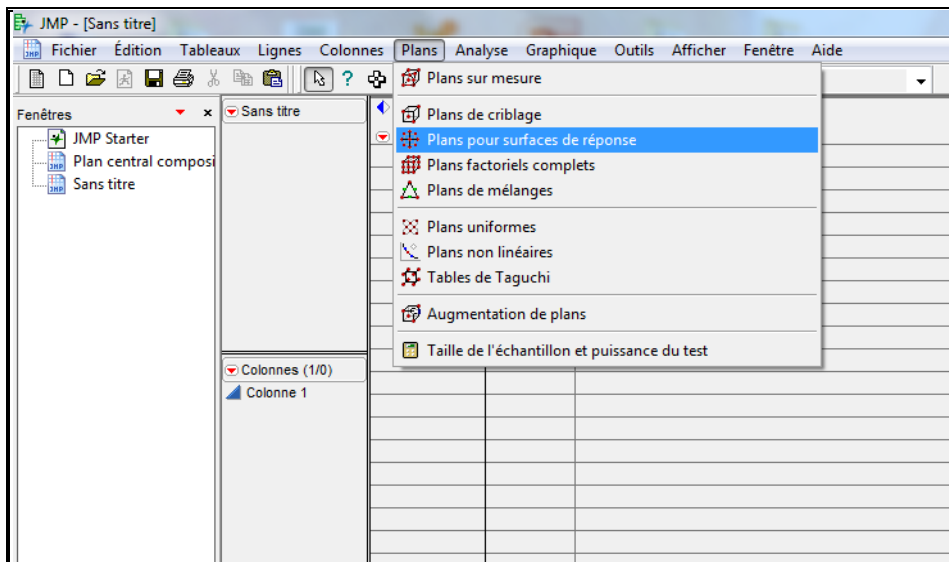
- [41] B. BOULEKBACHE1\* , , *Mostefa HAMRATI, Mohamed CHEMROUK2, Sofiane AMZIANE, Mostefa HAMRATI, Mohamed CHEMROUK2, Sofiane AMZIANE* *Comportement des bétons fibrés à la flexion : influence des fibres et de la résistance à la compression*. 2013.
- [42] JC .GIBBS and W.ZHU« *le béton auto plaçant ou auto compactant -cédions of First international RILEM symposium on self-compacting concrete PRO 7 Stockholm, suede :199-209 ,1999..*
- [43] NAKAMURA, OGAWA, *Influence of interaction between sand and superplasticizer on the fluidity of concrete, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1999, vol 21, pp 15-20..*
- [44] OKAMURA et OUCHI, *Self-compacting concrete, Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp 5-15.*
- [45] FELEKOGLU B ., YARDIMCI M. Y. and BARADAN B., *A ``A comparative study on the Use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting-concrete`` ,Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on self-compacting-Concrete PRO 3.*
- [46] SAKATA K ., «*Durability of self-compacting concrete and low heat high-performance Concrète ,CONSEC 98,International Conférence 2, pp.2057- 2064 ,Tronso,GB,1998..*
- [47] HU C . et BARBIERI B ., « *Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d' un béton fluide traditionnel » ,Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265 272, 1ere Rencontre Internationale, Toulouse,5 6 mars 1998.*
- [48] PETERSSON.P, P.BILLBERG and B, K. VAN “*AA MODELE for self-compacting concret “ In procidings of international relem conference on production method s and workability of concret . RILEM ,1999..*
- [49] BARCELO L, BOIVIN S, ACKER P, TOUPIN J. and CLAVAUD B,*Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms” , Concrete Science and Engineering, Vol.3, pp.85-91, juin 2001. 2001.*
- [50] M. HAYAKAWA, Y. MATSUOKA and K. YOKOTA."*Application of superworkable concrete". 1995.*
- [51] FUJIWARA, S. NAGATAKI ,H." *Self compacting property of highly flowable concrete” ,Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314,. 1995.*
- [52] T. P., *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation;thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes,. 2004.*
- [53] SEDRAN, *Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants,1999, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 220 pages..*

- [54] FUJIWARA H “Fundamental study on the self-compacting property of high-fluidity concrete”, *Proceeding of the Japan Concrete Institute, Vol.14, N°1, pp.27-32, 1992.*
- [55] EDAMATSU, NISHIDA et OUCHI, *A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm, pp 309-320..*
- [56] VAN BUI et MONTGOMERY, *Mixture proportioning method for self-compacting highperformance concrete with minimum paste volume, Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp 373-384..*
- [57] De LARRARD, *Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34..*
- [58] *Norme Française P18-598., (1991), Granulats, essai d'équivalent de sable, Éditions AFNOR, Paris, 1991..*
- [59] BEDRINA M., (2007), *Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables a base, de déchets de bois, Thèse de doctorat, ENP, Algérie..*
- [60] *Norme Française P18-555., (1990), Granulats – Mesures des Masses Volumiques, Coefficient d'Absorption et Teneur en Eau des Sables, Éditions AFNOR, Paris, 1990..*
- [61] DREUX G, FESTA J., (2002), *Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Edition Eyrolles.*
- [62] AFGC, *Association Française de Génie Civil (AFGC), Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires, juillet 2002, 63 pages..*
- [63] BRAQUENIER .J., -CetJ .DESNYTER.J, « le béton auto plaçant ou autocompactant», .
- [64] GOUPY Jacques «Introduction aux Plans d'expériences». *Dunod. Paris. (2001).page180..*
- [65] Montgomery, D C (2005) *Design and analysis of experiments, 6th ed. Hoboken, Nj: Wiley. 2005.*
- [66] Dugue D. (1958). *Traité de statistique Théorique et appliquée. Masson, paris..*
- [67] EFNARC, *Specifications and guidelines for self-compacting concrete, février 2002, 32 pages..*

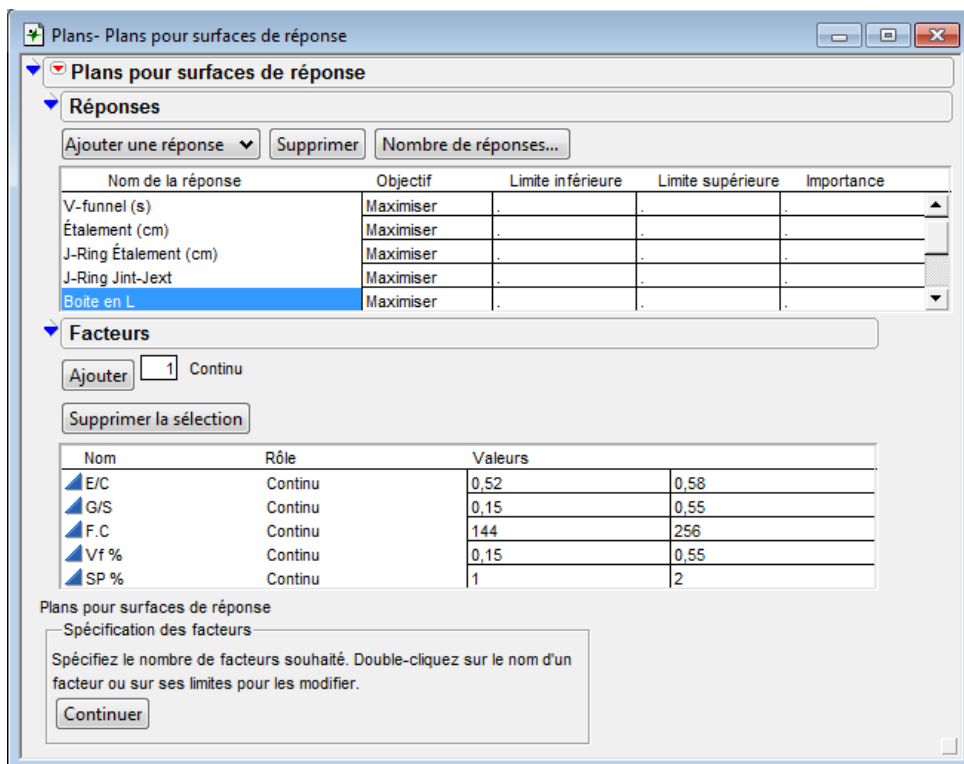
# Annexes

## A.1. Présentation du logiciel JMP

choix du plan d'expérience.



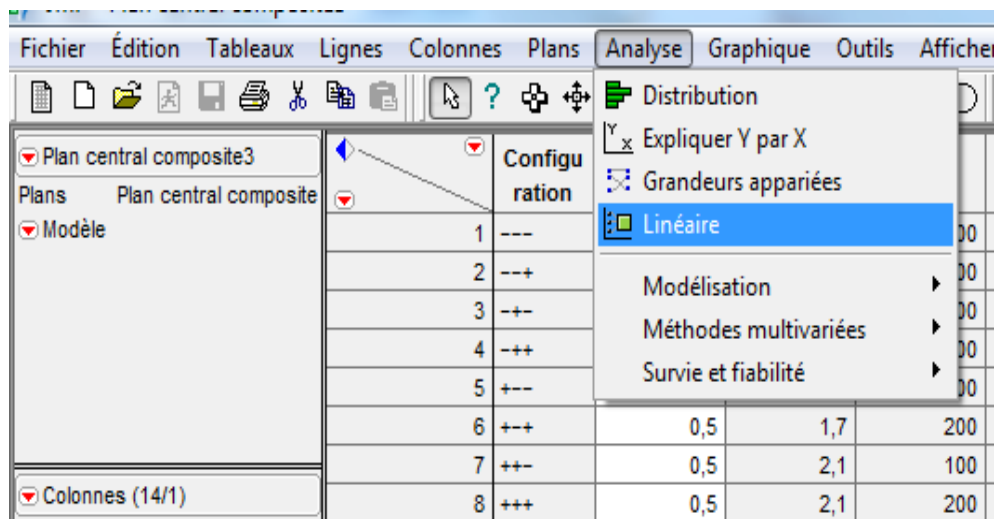
saisies des données (réponses et facteur)



### Introduction des résultats expérimentaux

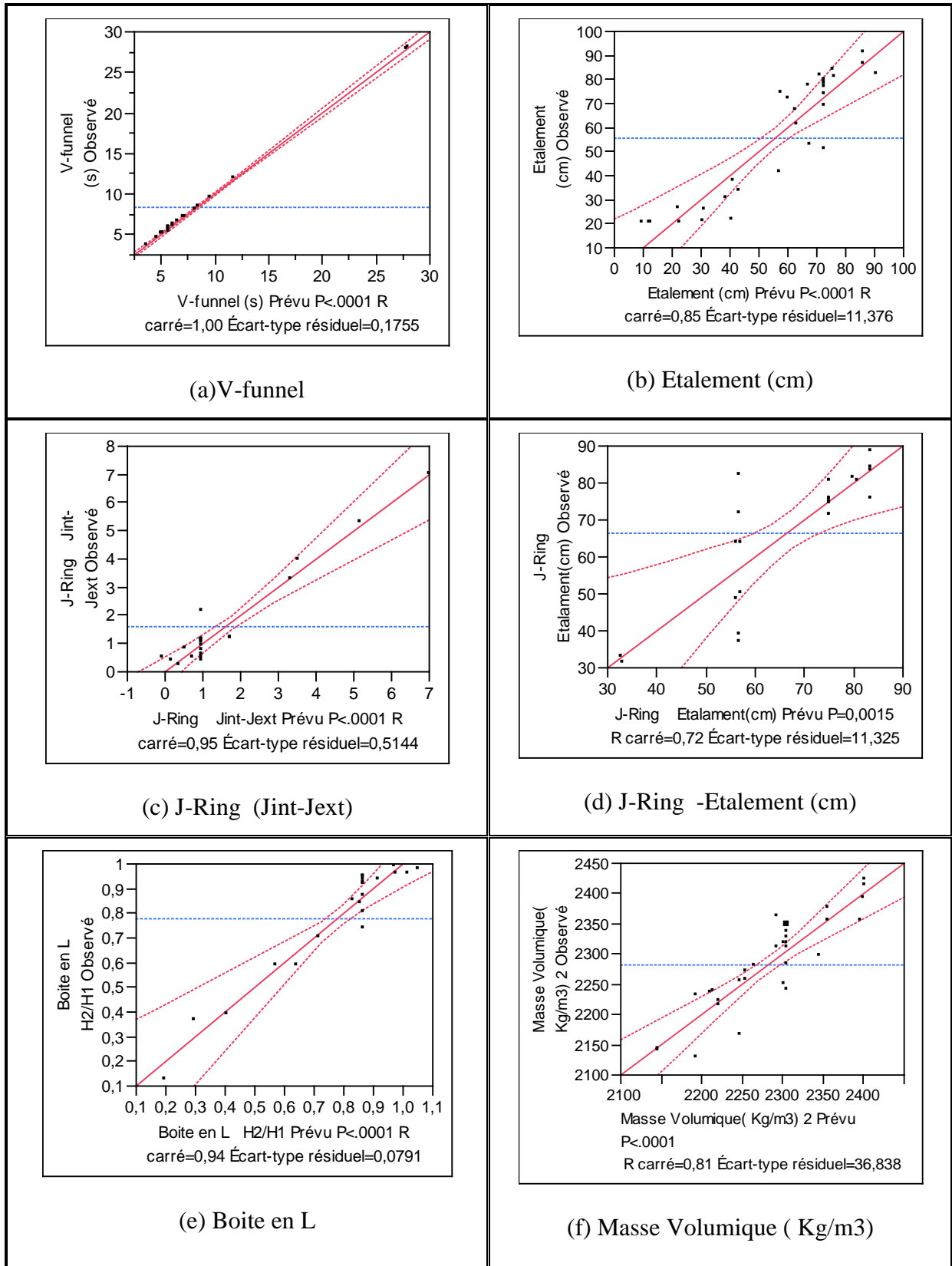
Configu ration	E/C	G/S	F.C	Vf%	Sp%	v-funnel(s)	
6	----+	0,52	0,55	144	0,15	2	7,1
7	---+-	0,52	0,55	144	0,55	1	•
8	----+	0,52	0,55	256	0,15	1	•
9	++++	0,52	0,55	256	0,55	2	8,45
10	0a000	0,55	0	200	0,35	1,5	•
11	00a00	0,55	0,35	100	0,35	1,5	7,05
12	000a0	0,55	0,35	200	0	1,5	11,8
13	0000a	0,55	0,35	200	0,35	0,6	•
14	00000	0,55	0,35	200	0,35	1,5	5,32
15	00000	0,55	0,35	200	0,35	1,5	5,74
16	00000	0,55	0,35	200	0,35	1,5	5,45
17	00000	0,55	0,35	200	0,35	1,5	5,76
18	00000	0,55	0,35	200	0,35	1,5	5,6
19	0000A	0,55	0,35	200	0,35	2,4	6,09
20	000A0	0,55	0,35	200	0,7	1,5	7,01
21	00A00	0,55	0,35	300	0,35	1,5	7,15
22	0A000	0,55	0,7	200	0,35	1,5	5,15
23	++++	0,58	0,15	144	0,15	2	6,45
24	---+-	0,58	0,15	144	0,55	1	•
25	----+	0,58	0,15	256	0,15	1	•
26	++++	0,58	0,15	256	0,55	2	5,09
27	----+	0,58	0,55	144	0,15	1	6
28	++++	0,58	0,55	144	0,55	2	3,52
29	++++	0,58	0,55	256	0,15	2	4,49
30	++++-	0,58	0,55	256	0,55	1	9,47
31	A0000	0,6	0,35	200	0,35	1,5	5,08

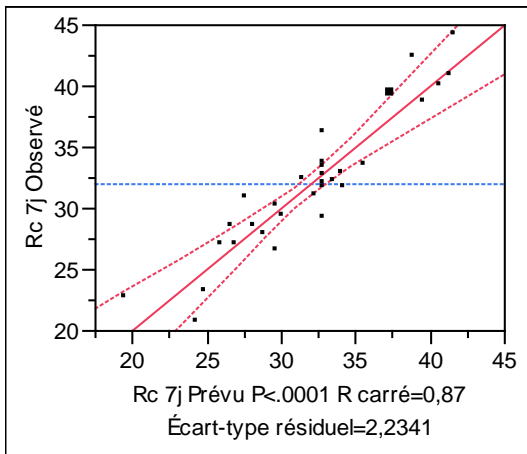
### Analyse des résultats



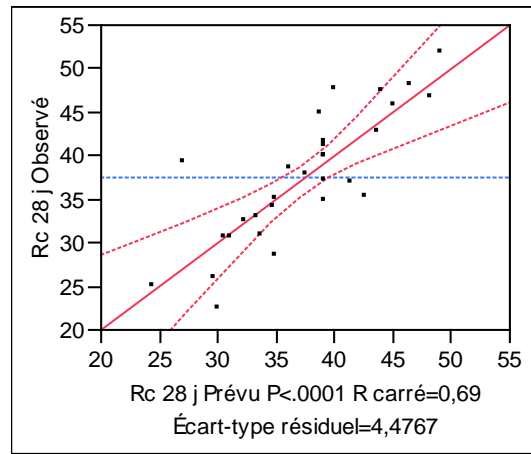
## A.2. Graphiques des réponses

### A.2.1. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

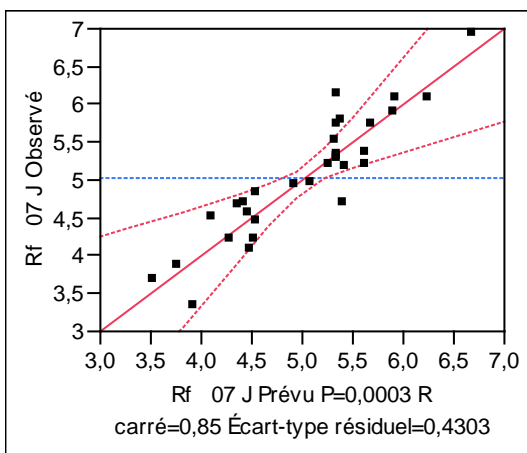




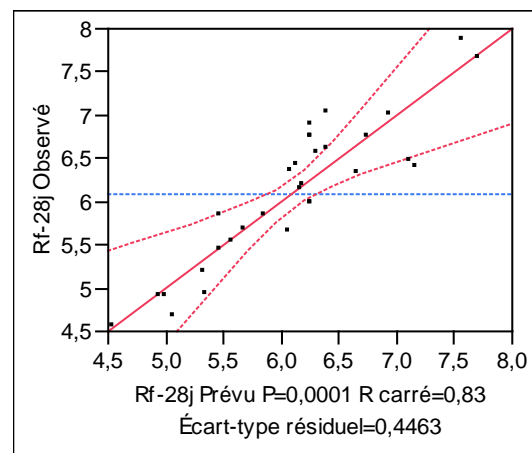
(g) Rc 07 j (Mpa)



(h) Rc 28 j (Mpa)



(I) Rf 07 j (Mpa)



(j) Rf 28 j (Mpa)

### A.3. Quelques photos des essais

Essai d'étalement au cône d'Abrams



### Essai d'étalement au J-ring



### Essai L-Box



### Essai de la stabilité au tamis



Essai au v-funnel



Remplissage des éprouvettes pour résistance

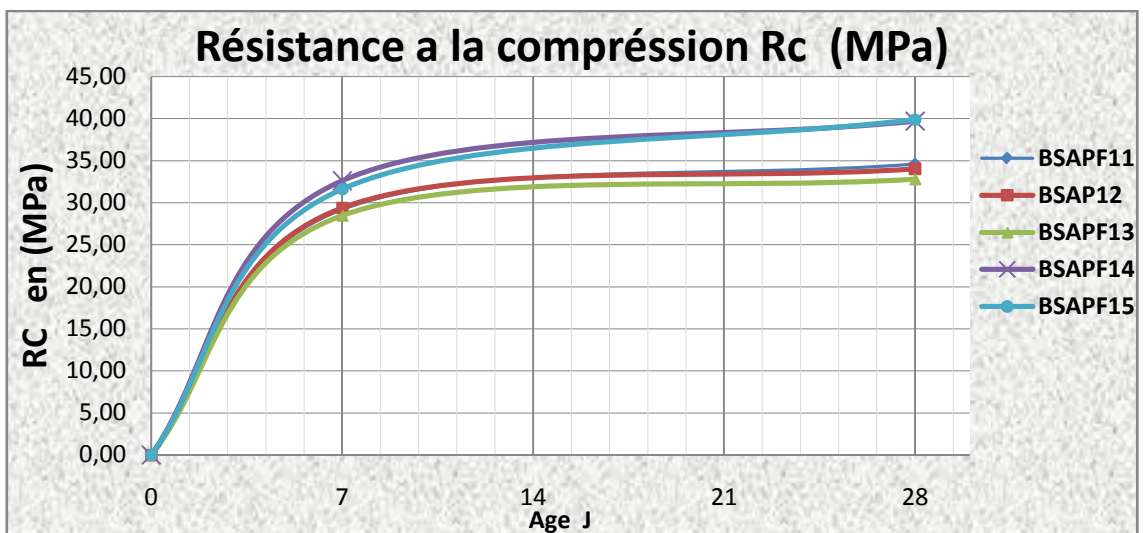
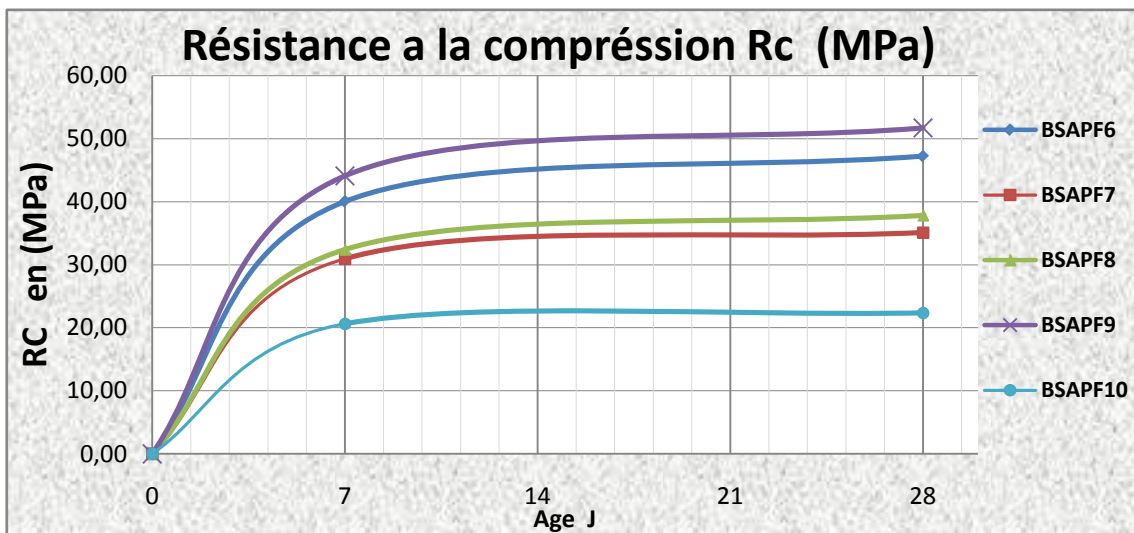
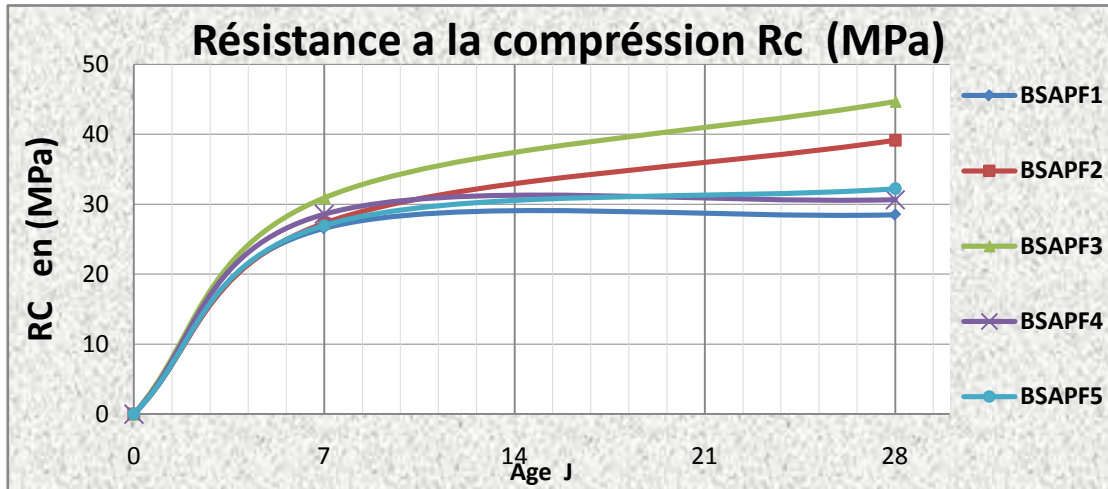


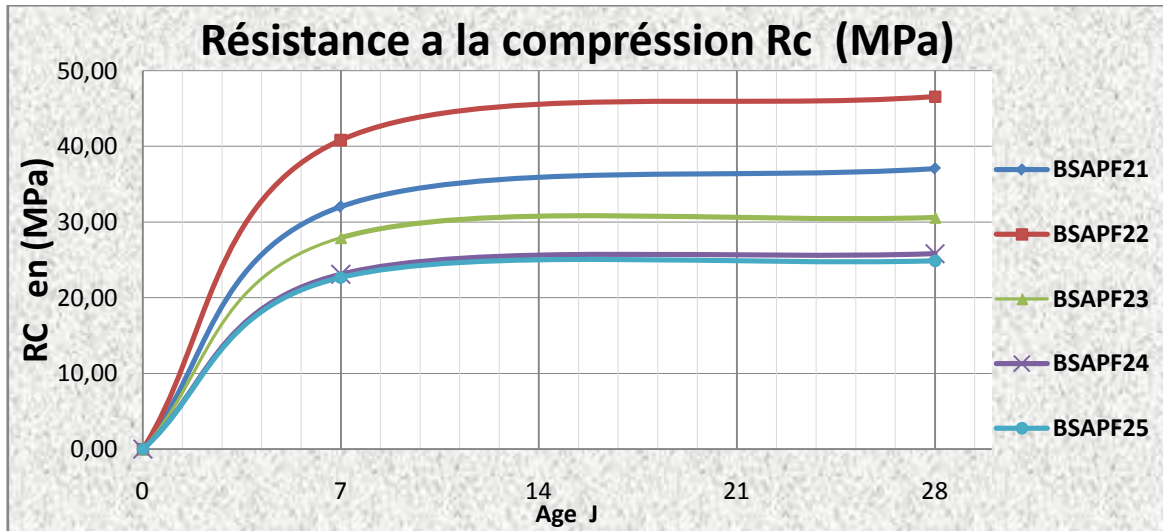
Modes de rupture des éprouvettes



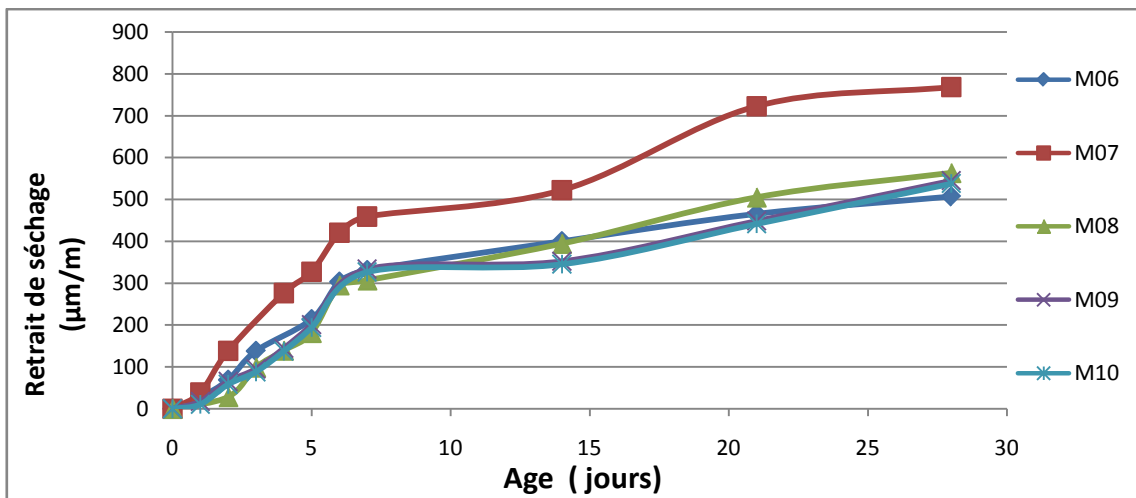
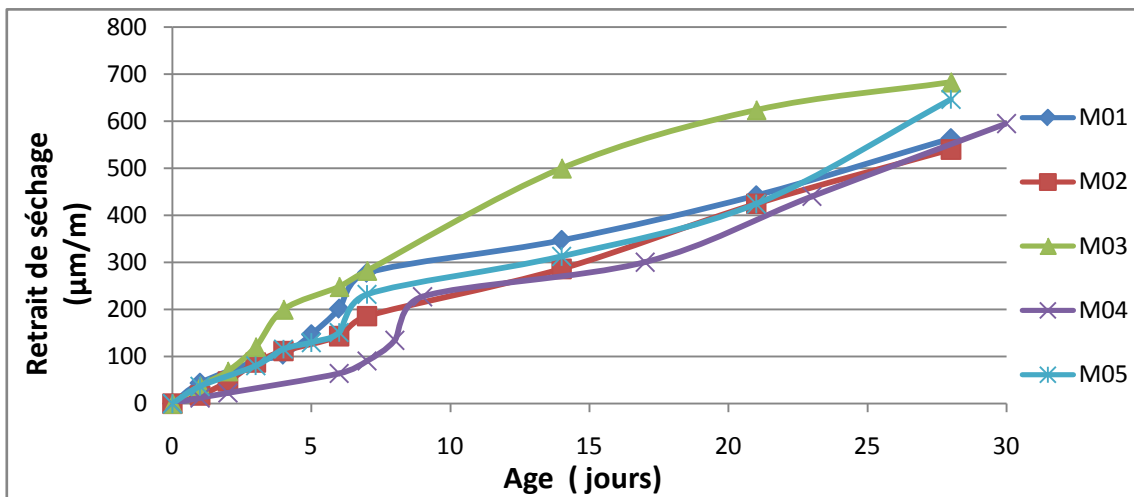
## A.4. Les courbe

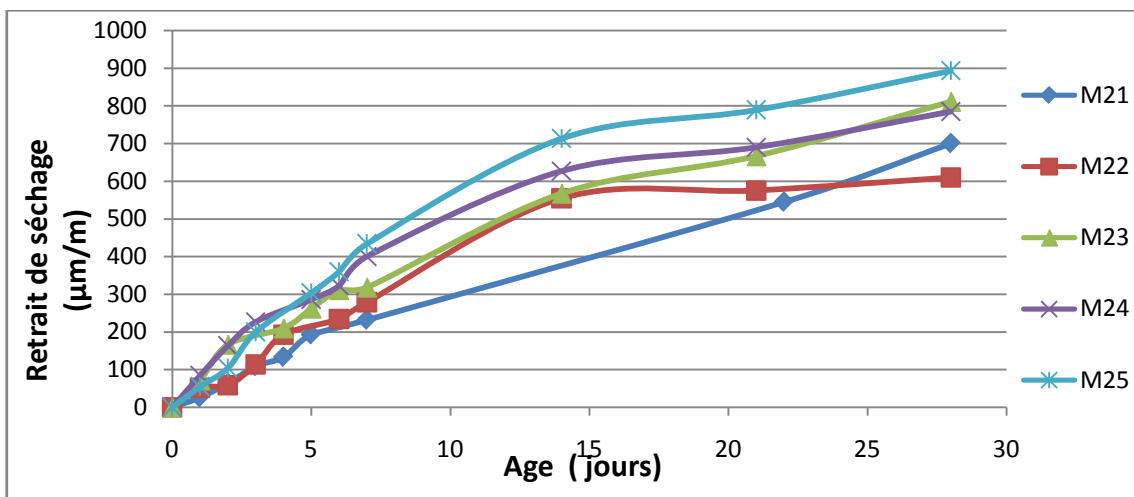
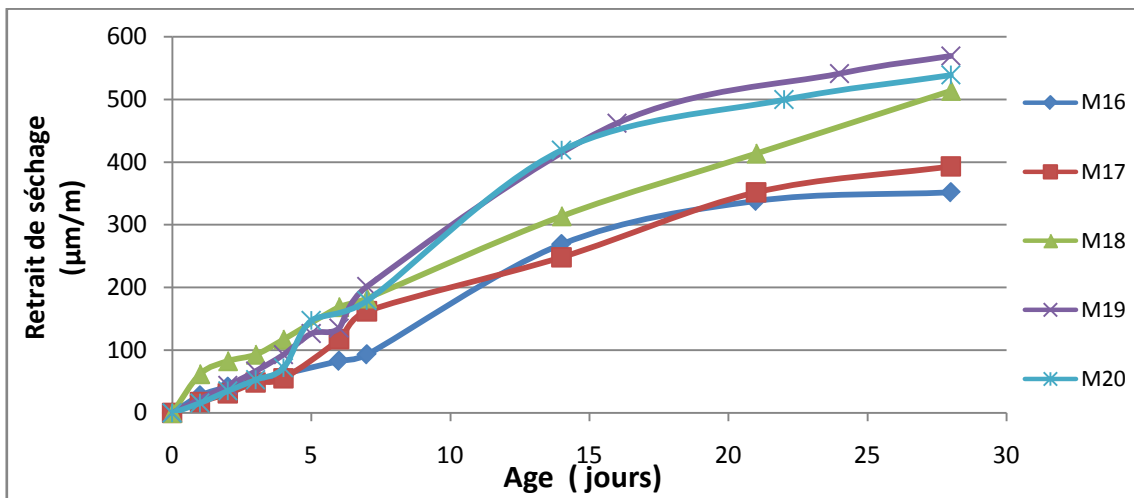
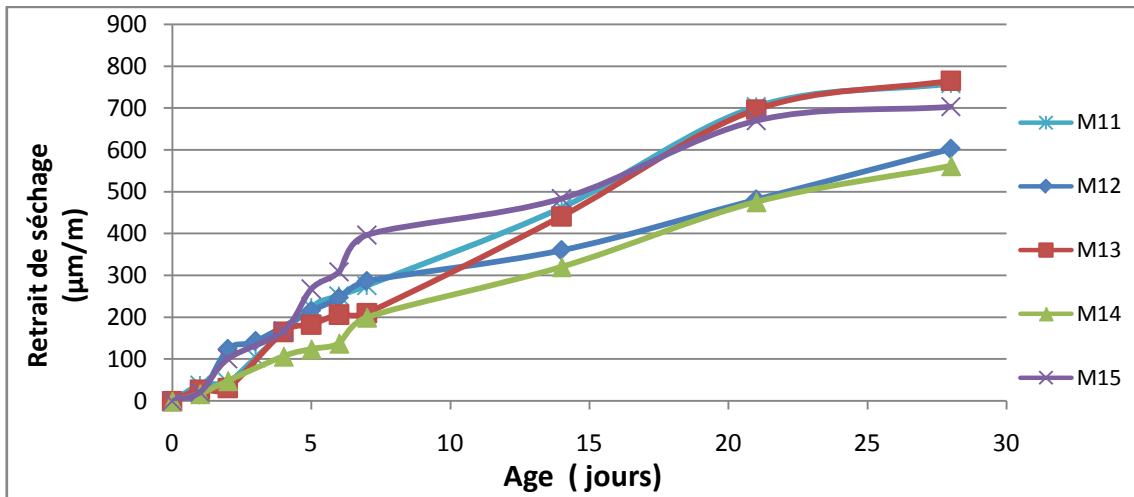
### A.4.1. La résistance à la compression Rc.

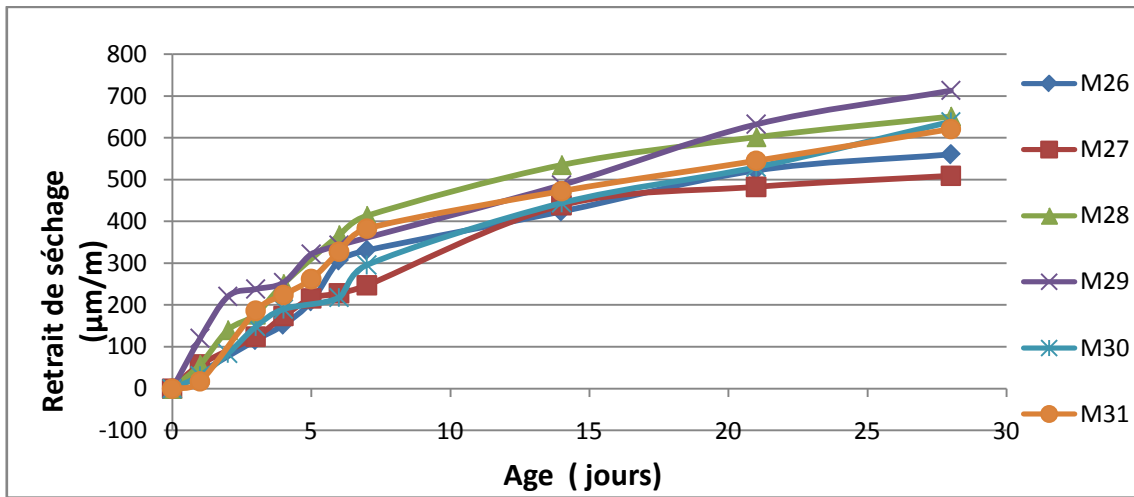




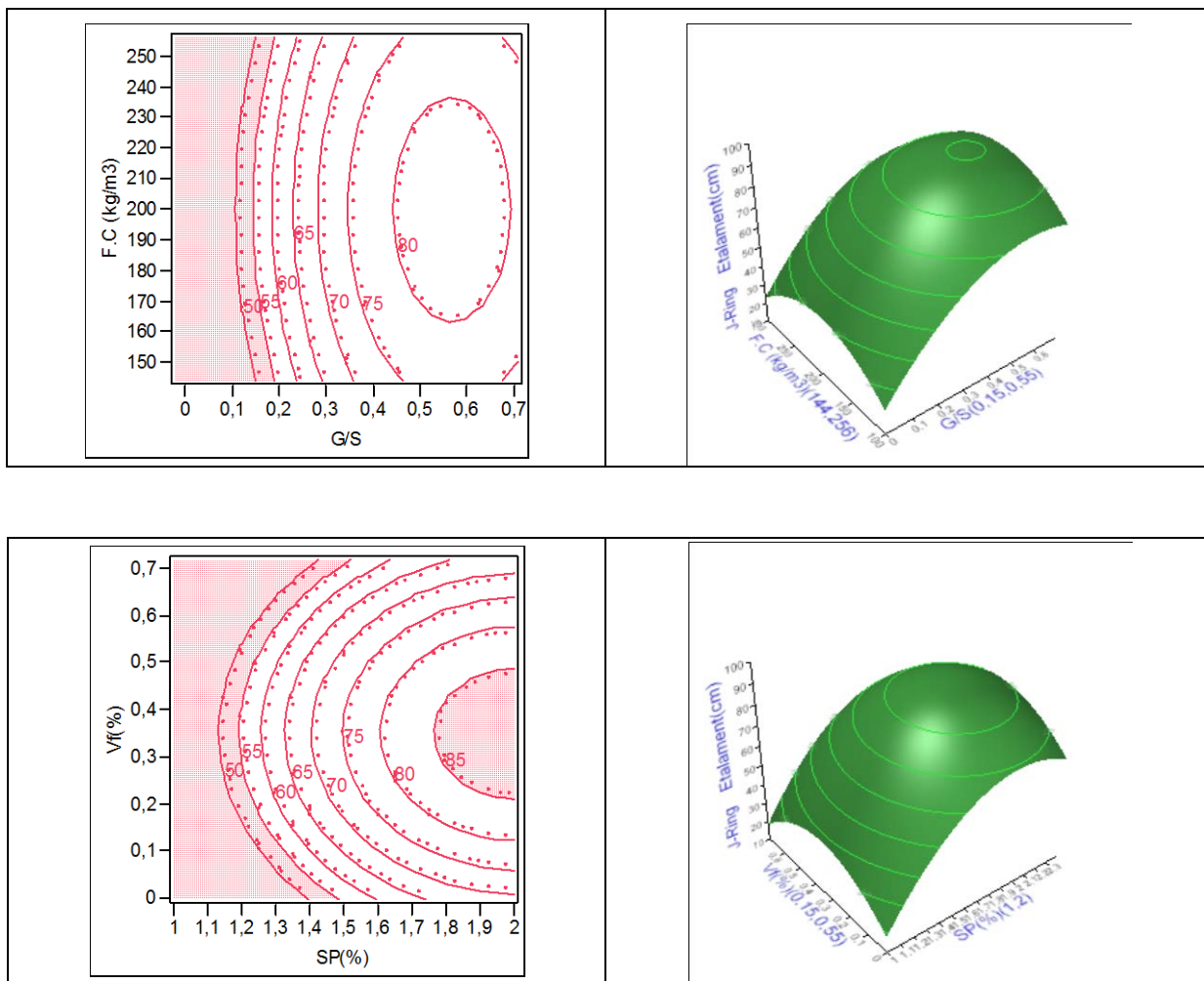
*A.2.1. Les courbes des retraits du 31mélanges.*







**A.4.3. Les courbes des profilers iso-réponses et les profilers de surfaces de Réponse 2D et 3D**



Annexes

