

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED EL-BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE Département de GENIE CIVIL



Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière: Génie Civil- Spécialité: Matériaux de GENIE CIVIL.

Par :

M^{lles} DRIDI Meriem & SEDDIKI Bouthaina

THÈME

Thixotropie des Bétons Autoplaçant : Formulation et Modélisation

Soutenu publiquement le : 01/07/2018

Devant le jury:

ACHOUR Yacine	Université de BBA	Président
NOUI Ammar	Université de BBA	Rapporteur
BOUGLADA Mohammed Salah	Université de BBA	Co-Rapporteur
MESSAOUDENE Ibrahim	Université de BBA	Examineur
LOGZIT Nacer	Université de BBA	Examineur
BELAGRAA Larbi	Université de M'Sila	Invité

REMERCIEMENT

D'abord nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser ce travail.

Il ne nous aurions été possible, à nous seules, d'achever le présent travail sans l'assistance, l'appui et le suivi minutieux de notre encadreur et Co-encadreur le *Mr. NOUI Amar et Mr. BOUGLADA Mouhamed Salah*

Nous tenons aussi à remercier *Mr. KESSAL Oussama* pour son conseil, les ingénieurs de laboratoire de génie civil université Bordj Bou-Argeridj de leurs soutiens et leurs aides précieuses pendant la durée de nos travaux.

Nos sincères remerciements vont au chef de département de génie civil *Mr. LOGZIT Nacer*, nos remerciements vont aussi au président et aux membres du jury de soutenance qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.



Nous dédions ce mémoire de MASTER à :

Nos Très Chers Parents pour leurs sacrifices

et leurs encouragements permanents, que

Dieu les protège,

Nos frères, nos sœurs,

Nos Familles, nos Proches et nos

Amis fidèles,

Tous ceux qui nous ont encouragés de près et de loin.

SEDDIKI Bouthaina

DRIDI Meriem



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

RESUME

L'emploi des bétons autoplaçant ne cesse de gagner du terrain et se généralise à diverses applications grâce à leurs multiples avantages techniques et socio-économiques. Cependant, la formulation des BAP est relativement complexe et coûteuse par rapport à un béton conventionnel vibré.

La présente étude consiste à étudier le comportement rhéologique d'un BAP par deux approches différentes ; la première approche consiste à préparer deux sables à base d'ajouts minéraux (laitier et pouzzolane) par substitution pondérale de 15% des fractions fines du sable dont le but d'évaluer l'effet des sables sur la rhéologie des pâtes de ciment et sur les performances aux états frais et durci des BAP formulés à base de ces deux sables on faisant varier le dosage en ciment (250, 300 et 350 kg/m³) avec un rapport E/L de 0,38 fixe, des déchets de poudre de verre (PV) sont introduits par substitution d'un taux de 20% en masse de ciment .

Dans la deuxième approche de ce contexte expérimental, on a étudié le comportement rhéologique et la mesure des paramètres rhéologiques le seuil de cisaillement et la viscosité plastique ainsi que la résistance à la compression à 28 jours d'un BAP, on agit sur la formulation par l'établissement d'une série de combinaisons entre les paramètres influents.

Dans le but d'optimiser le nombre d'essais, qui répondent correctement à nos attentes, nous avons utilisé une approche statistique informatisée dite « plans d'expériences ».

Nous avons préparé un ensemble de mélanges (BAP) sur la base d'un plan d'expériences en faisant varier le niveau des trois facteurs influents ; Le dosage en ciment (350 et 400Kg/m³), le pourcentage de la fumée de silice (5%, 10% et 15%) et le rapport G/S (0,85, 1 et 1,15) .

En fin cette approche nous a permis d'évaluer l'influence de chaque constituant sur le comportement rhéologique et mécanique des BAP testés, ainsi l'estimation de l'interaction entre différents facteurs et permet d'aboutir à une modélisation des réponses étudiées pour une meilleure prédiction et une bonne compréhension et analyse du comportement rhéologique et mécanique des BAP.

Mots clés : béton autoplaçant, ajouts cimentaires, filler, rhéologie, seuil de cisaillement, viscosité plastique, propriétés mécaniques.

ABSTRACT

The use of Self Compacting Concrete is becoming widely used thanks to its multiple technical and social-economic advantages. Meanwhile, the formulation of the SCC is relatively complex and expensive compared to a vibrated conventional concrete.

The present study consists in studying the rheological behavior of a SCC by two different approaches; the first approach consists in preparing two sands based on mineral additions (slag and pozzolan) by weight substitution of 15% of the fine fractions of the sand, the purpose of which is to evaluate the effect of sand on the rheology of cement pastes and on the performances in the fresh and hardened state of the BAP formulate based on these two sands by varying the cement dosage (250, 300 and 350 kg / m³) with a ratio W / B of 0.38 fixed, waste of glass powder (GP) are introduced by substituting a rate of 20% by mass of cement.

In the second approach of this experimental context we studied the rheological behavior and the measurement of the rheological parameters theyield stress and the plastic viscosity as well as the compressive strength at 28 days of a BAP, acting on the formulation by establishing a series of combinations between the influencing parameters.

In order to optimize the number of tests, which correctly meet our expectations, we used a computerized statistical approach called "method of experimental design".

We prepared a set of mixtures (BAP) based on experimental designby varying the level of the three influencing factors; The cement dosage (350 and 400Kg / m³), the percentage of silica fume (5%, 10% and 15%) and the G / S ratio (0.85, 1 and 1.15).

Finally, this approach allows us to evaluate the influence of each constituent on the rheological and mechanical behavior of the BAP tested, thus the estimation of the interaction between different factors and allows to lead to a modeling of the responses studied for a better prediction and a good understanding and analysis of the rheological and mechanical behavior of SCC.

Key words:self - placing concrete, cement additions, filler, rheology, shear threshold, plastic viscosity, mechanical properties.

ملخص

إن استخدام الخرسانة ذاتية الوضع يكتسب أرضية وينتشر في مختلف التطبيقات بفضل مزاياها التقنية و الصوسيو اقتصادية المتعددة. لكن صياغة الخرسانة ذاتية الوضع معقدة نسبيا ومكلفة مقارنة بالخرسانة التقليدية

تتألف الدراسة الحالية من دراسة ريولوجيا الخرسانة ذاتية الوضع من خلال نهجين مختلفين. ينطوي النهج الأول على إعداد نوعين من الرمال المضافة إليها (بقايا الحديد المنصهر المهروسة و البوزلان) و ذلك باستبدال نسبة 15% من كتلة الرمل بهدف تقييم تأثير الرمال على ريولوجيا عجينة الإسمنت وعلى أداء الخرسانة في الحالة السائلة و حالة التصلب.

قمنا بتغيير كمية الاسمنت (250، 300 و 350 كغ / م³) مع $E/L = 0.38$ ثابت، يتم إدخال مسحوق الزجاج (PV) عن طريق استبدال المعدل 20% من كتلة الإسمنت.

في النهج الثاني لهذه الإعدادات التجريبية تمت دراسة الريولوجيا وقياس إجهاد الخضوع واللزوجة والقوة الضاغطة في 28 يوما للخرسانة ذاتية الوضع، التمثيل واحد على صياغة من قبل إنشاء سلسلة من المجموعات بين المعلمات المؤثرة. عملنا على الخرسانة عن طريق صياغة سلسلة من مجموعات بين العوامل المؤثرة.

من أجل تحسين عدد الاختبارات التي تلبية توقعاتنا بشكل صحيح، استخدمنا نهجًا إحصائيًا محسوبًا يسمى "الخطط التجريبية".

قمنا بإعداد مجموعة من الخلطات للخرسانة ذاتية الوضع على أساس خطة من التجارب عن طريق تغيير مستوى العوامل المؤثرة الثلاثة؛ محتوى الإسمنت (350 و 400 كغ/ م³)، و النسبة المئوية للغبار السيليكا (5%، 10% و 15%) ونسبة G/S (0.85 , 1 , 1.15)

في النهاية يسمح هذا النهج لنا بتقييم تأثير كل مكون على الريولوجيا والخصائص الميكانيكية للخرسانة ذاتية الوضع مع اختبار و تقدير التفاعل بين العوامل المختلفة و يسمح لنا أيضا بالوصول إلى نماذج الإجابة لدراسة أفضل التنبؤ و الفهم الجيد والتحليل للسلوك الانسيابي و الميكانيكي للخرسانة.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة ذاتية الوضع، المضافات للإسمنت، حشو، الريولوجيا، عتبة القص، اللزوجة البلاستيكية، الخواص الميكانيكية

Sommaire

RESUME.....	5
ABSTRACT.....	5
ملخص.....	5
Sommaire	5
Liste des figures	5
Liste des tableaux.....	5
Les notations	5

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :	2
Objectifs :	2
Méthodologie du travail :	3

CHAPITRE I: REVUE GENERALE SUR LE BETON AUTOPLAÇANT ET LES AJOUTS MINERAUX

Partie 1 : Généralités sur les Bétons Autoplaçants

I.1.1 : Introduction :	5
I.1.2 : Généralités sur les BAP :	5
I.1.2.1 : Définition des BAP :	5
I.1.2.2 Domaine d'utilisation des BAP :	5
I.1.2.3 Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant :	6
I.1.2.4 : Intérêts techniques et impacts Socio-économiques :	6
I.1.3 : Les principaux constituants d'un béton autoplaçant :	7
I.1.3.1. Le ciment :	7
I.1.3.2. Les granulats :	10
I.1.3.3. Eau de gachage :	10
I.1.3.4. Additions minérales :	11
I.1.3.5. Adjuvants (superplastifiants) :	11
I.1.4 : Modes de formulation des BAP :	11
I.1.4.1 : Approche japonaise :	11
I.1.4.2: Approche CBI (suédoise) :	12
I.1.4.3: Approche LCPC :	12
I.1.5 : Paramètres influençant la formulation des BAP :	13

I.1.5.1 : Un volume de pâte élevé :	13
I.1.5.2 : Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante :	13
I.1.5.3 : L'emploi d'un superplastifiant :	14
I.1.5.4 : Un faible volume de gravillon.....	15
Partie 2 : Les ajouts minéraux	
I.2.1 : Introduction :	16
I.2.2 : Les ajouts minéraux :	16
I.2.2.1 : Laitier de haut fourneau :	16
I.2.2.2 : La pouzzolane :	18
I.2.2.3 : La fumée de silice :	21
I.2.2.4 : La poudre de verre:	23
Conclusion.....	28

CHAPITRE II: RHEOLOGIE ET MODELISATION

Partie 01 : La rhéologie des BAP

II.1.1 : Introduction :	30
II.1.2 : Définition de la rhéologie :	31
II.1.3 : Comportements rhéologiques :	31
II.1.4 : Définition des propriétés rhéologiques :	32
II.1.4.1 : Le taux de cisaillement :	32
II.1.4.2 : La viscosité :	33
II.1.4.3 : Le seuil de cisaillement :	35
II.1.5: La thixotropie et anti thixotropie :	35
II.1.5.1 : Thixotropie:	35
II.1.5.2 :L'Anti thixotropie :	36
II.1.6: Différents types de modèles d'écoulement appliqués aux bétons :	36
II.1.7: Rhéologie des BAP :	38
II.1.8 : Rôle des constituants :	39
II.1.8.1: À l'échelle de la pâte :	39
II.1.8.2:À l'échelle du BAP :	43

Partie 02 : Méthodes des plans d'expériences

II.2.1 : Introduction :	46
II.2.2 : Définition :	46
II.2.3 : Le principe :	46

II.2.4 : Démarche méthodologique :.....	47
II.2.5: Analyse des résultats :.....	48
II.2.6 : Terminologie :.....	48
II.2.6.1 : Les différents types de facteurs :	48
II.2.6.2 : Notion d'espace expérimental.....	49
II.2.7 : Intérêts des plans d'expériences :.....	51
II.2.8 : Méthodologie des plans d'expériences	51
II.2.8.1 : La recherche des facteurs influents.....	51
II.2.8.2 : La modélisation.....	51
II.2.8.3 : L'optimisation	52
II.2.9 : Présentation de logiciel « Design-Expert »	52

CHAPITRE III

PROTOCOLE DES ESSAIS, MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION

III.1 : Introduction :.....	54
Partie 1 : Matériaux utilisés et protocoles d'essais	
III.1.1 Sable :.....	54
III.1.1.1 Caractéristique :.....	54
III.1.1.2: Composition granulométrique des sables préparés:	54
III.1.1.3 Protocole d'essai de sable :.....	56
III.1.1.3.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NF EN 933-1].....	56
III.1.1.3.2 Module de finesse :.....	57
III.1.1.3.3 Equivalent de sable : [NF EN 933-8]	58
III.1.1.3.4 Masse volumique : [NF EN 1097-6]	60
III.1.2 Gravier :.....	62
III.1.2.1 Caractéristiques du gravier :	62
III.1.2.2 Méthode de préparation du gravier :.....	62
III.1.2.3 Protocole d'essai de gravier :.....	63
III.1.2.3.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NF EN 933-5]	63
III.1.2.3.2 La densité :	65
III.1.2.3.3 La masse volumique : [NF EN 1097-6].....	65
III.1.2.3.7 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles): [EN 1097-2]	68
III.1.2.3.8 Degré d'absorption d'eau : [EN 1097-6]	69
III.1.3 Les ajouts minéraux :.....	69

III.1.3.1 Caractérisation des ajouts :	69
III.1.3.2 Préparation des ajouts :	73
III.1.4 Ciment :	73
III.1.4.1 Caractéristiques de ciment :	73
III.1.5 Eau de gâchage :	73
III.1.6 Adjuvant :	74

Partie 02 : Formulation du BAP et protocoles d'essais

III.2.1 Application numérique de la formulation du BAP selon LCPC:	76
III.2.2 : Formulation du BAP par plan d'expérience :	78
III.2.3 Préparation des BAP :	80
III.2.4 Méthodes de caractérisation du BAP à l'état frais :	81
III.2.4.1 Essais de caractérisation de la pâte :	81
III.2.4.2 Essais de caractérisation des BAP :	81
III.2.4.2.1 Essais réalisés à l'état frais :	81
III.2.4.2.2 ICAR rhéomètre :	83
III.2.4.2.3 : Conservation des éprouvettes :	85
III.2.4.2.4 : Essais réalisés à l'état durci :	85

Conclusion

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 : Introduction :	92
-----------------------------	----

Partie 01 : Résultats et interprétations

IV.1.1 : BAP à base d'un sable préparé :	93
IV.1.1.1 : Résultats des propriétés physiques des BAP _{SP} :	93
IV.1.1.2: Comportement rhéologique des BAP _{SP} :	95
IV.1.1.3 : Comportement mécanique des BAP _{SP} :	97
A- Essais destructif :	97
1-Résistance de compression :	97
2-Essai de traction par flexion :	99
B- Essais non destructif :	100
1-Essai au scléromètre :	100
2-Essai d'auscultation dynamique :	101
IV.1.2 : BAP réalisés par le plan d'expérience :	103

IV.1.2.1 : Caractéristiques physiques des BAP _{PX} à l'état frais :	103
IV.1.2.2 : Résultats des essais réalisés sur BAP _{PX} à l'état durci :	107
IV.1.2.3 : les caractéristiques rhéologiques des BAP _{PX} :	111

Partie 02 : modélisation et analyse des résultats

IV.2.1 : seuil de cisaillement :.....	113
IV.2.2 : viscosité :	118
IV.2.3 : Résistance à la compression à 28jours :.....	121

CHAPITRE V:

CONCLUSION GENERALE

Conclusion général :.....	126
Perspectives et recommandations :	127

Les références bibliographiques

Liste des figures

Figure I. 1 : La composition du béton autoplaçant et du béton conventionnel (Sheinn, A.M.M, 2007)	7
Figure I. 2: Dispersion des granulats par excès de pâte (Boukni.B, 2007)	13
Figure I. 3: Phénomène de ressuage (Assié S, 2004)	14
Figure I. 4: Action des superplastifiants, défloculation des grains de ciment	15
Figure I. 5: Laitier de haut fourneau	17
Figure I. 6: La pouzzolane naturelle.	19
Figure I. 7: Le déchet de verre.	23
Figure I. 8: Résistance à la compression pour les bétons ternaires (Abdalla, 2012).	25
Figure I. 9: Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (Shayan et Xu, 2004)	26
Figure II. 1: Classification des fluides selon leur comportement rhéologique	31
Figure II. 2: Ecoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan.	33
Figure II. 3: La viscosité plastique	34
Figure II. 4: Le corps thixotropie	36
Figure II. 5: Système présentant un Anti thixotropie	36
Figure II. 6: Les différents types de modèles d'écoulement	37
Figure II. 7: Ecoulement d'un fluide Binghamien dans un rhomètre à cylindres coaxiaux	38
Figure II. 8: Influence du rapport seuil de cisaillement/ viscosité plastique sur l'erreur due à la négligence de la zone morte (Vitesse de rotation= 10 rpm à 60 rpm) (Koehler et al, 2004)	39
Figure II. 9: Courbe d'écoulement des pâtes de ciment sans superplastifiant (Cyr et al, 2000)	41
Figure II. 10: Distribution granulométrique du ciment portland ordinaire (OPC) et du ciment très fin (SFC) (Chen et Kwan, 2012)	42
Figure II. 11: Effet du dosage en SP sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment portland (Park et al, 2005)	43
Figure II. 12: Exemples de comportement rhéologiques pour différents types de béton (Assié S, 2004)	44
Figure II. 13: Le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur	49
Figure II. 14: L'espace expérimental d'un facteur	49
Figure II. 15: Les points expérimentaux dans un espace.	50
Figure II. 16: Les points expérimentaux dans un domaine d'étude	50
Figure III. 1: Les différentes fractions du sable préparé	55
Figure III. 2: Analyse granulométrique du sable d'Oued Souf.	57
Figure III. 4: Les fractions du gravier après tamisât	64
Figure III. 5: L'analyse granulométrique du gravier (3/8)	64
Figure III. 6: L'analyse granulométrique du gravier (8/15)	65
Figure III. 8: La pouzzolane broyée.	70
Figure III. 9: Laitier broyé	71
Figure III. 10: La poudre de verre.	72

Figure III. 11: Ciments utilisés CEMII/42.5 et MATIN Lafarge.	73
Figure III. 12: Le super plastifiant MEDAFLOW 30.	74
Figure III. 13: Essai de mini cône.	81
Figure III. 14: Essai d'étalement au cône d'Abrams.	82
Figure III. 15: L'essai de la boîte en L (L-BOX).	82
Figure III. 16: Essai de stabilisation au tamis.	83
Figure III. 17: ICAR rhéomètre et ces constituants.	84
Figure III. 18: Fenêtre de logiciel ICAR Rheometor.	84
Figure III. 19: Le bac de conservation des éprouvettes.	85
Figure III. 20: La presse hydraulique, laboratoire Génie Civil BBA.	86
Figure III. 21: La presse hydraulique de l'essai de la traction par flexion université BBA.	87
Figure III. 22: l'appareil scléromètre.	87
Figure III. 23: La courbe de transformation unique.	88
Figure III. 24: L'appareil d'auscultation dynamique (ultrason)	89
Figure III. 25: Courbe RILEM	90
Figure IV. 1: Les variations de l'étalement des différents BAP formulés.	93
Figure IV. 2: Les variations de l'écoulement des différents BAP formulés.	94
Figure IV. 3: Les variations de la stabilisation aux tamis des différents BAP _{SP} formulés.	95
Figure IV. 4: Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) affiché par ICAR- Rhéomètre.	96
Figure IV. 5: Valeurs du seuil de cisaillement et la viscosité des BAP _{PS}	96
Figure IV. 6: La variation de la résistance à la compression des différents type de béton au cours du temps.	98
Figure IV. 7: Taux d'évolution des réponses mécanique des bétons formulée à base de sable préparé.	98
Figure IV. 8: La variation de la résistance à la flexion des différents type de béton au cours du temps.	100
Figure IV. 9: La résistance à la compression obtenue par l'essai au scléromètre des BAP _{SP}	101
Figure IV. 10: Vitesse de son des différents types de béton.	102
Figure IV. 11: La variation d'étalement des BAP _{PX} pour le dosage 400 Kg/m ³	104
Figure IV. 12: La variation d'étalement des BAP _{PX} pour le dosage 350Kg/m ³	104
Figure IV. 13: La variation d'écoulement des BAP _{PX} pour le dosage 400 Kg/m ³	105
Figure IV. 14: La variation d'écoulement (en %) des BAP _{PX} pour le dosage 350 Kg/m ³	105
Figure IV. 15: La variation de la stabilité aux tamis des BAP _{PX} pour le dosage 400Kg/m ³	106
Figure IV. 16: La variation de la stabilité aux tamis des BAP _{PX} pour le dosage 350 kg/m ³	106
Figure IV. 17: Evolution de la résistance à la compression des BAP _{PX} pour le dosage de ciment 350Kg/m ³	108
Figure IV. 18: Evolution de la résistance à la compression des BAP _{PX} pour un dosage de 400Kg/m ³	108
Figure IV. 19: Vitesse de son des BAP _{PX} pour le dosage 350 Kg/m ³	109
Figure IV. 20: Vitesse de son des BAP _{PX} pour un dosage de 400Kg/m ³	110
Figure IV. 21: Diagramme vitesse-couple pour BAP _{PX} du M3 (G/S= 0.85, FS= 5%, CIM= 350Kg/m ³) et M7 (G/S= 0.85, FS= 5%, CIM= 400Kg/m ³).	112
Figure IV. 22: Les valeurs de seuil de cisaillement de chaque mélange pour les deux dosages en ciment (350 et 400 Kg/m ³).	114

Figure IV. 23: Courbe de tendance des valeurs observées et des valeurs prévues selon modèle du seuil de cisaillement.....	115
Figure IV. 24: Diagramme de seuil de cisaillement pour un dosage de 350 Kg/m ³	116
Figure IV. 25: Diagramme de seuil de cisaillement pour un dosage de 400 Kg/m ³	116
Figure IV. 26: Courbe de tendance des valeurs observées et des valeurs prévues selon modèle de la viscosité.....	118
Figure IV. 27: Diagramme cubique de la viscosité pour un dosage de ciment 350 Kg/m ³	119
Figure IV. 28: Diagramme cubique de la viscosité pour un dosage de ciment 400Kg/m ³	119
Figure IV. 29: Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Rc ₂₈	122
Figure IV. 30: Diagramme de Rc ₂₈ pour un dosage de 350Kg/m ³	122
Figure IV. 31: Diagramme de Rc ₂₈ pour un dosage de ciment 400Kg/m ³	123

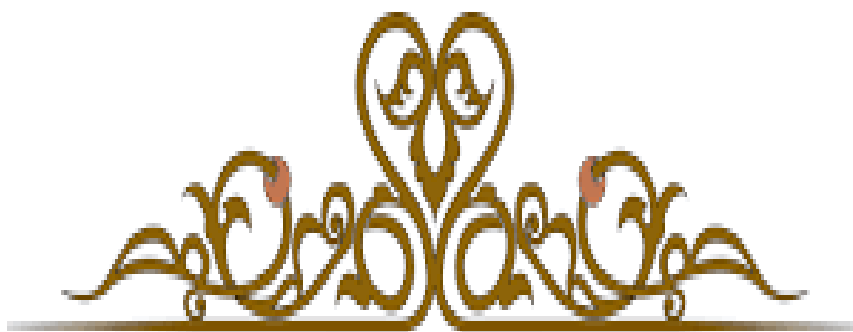
Liste des tableaux

Tableau I. 1: Liste des différents types des ciments courants normalisé par la norme NF P 15-301. ...	9
Tableau I. 2: Les classes du ciment selon la norme NF EN 196-1.	9
Tableau I. 3: La classification des fractions de grains selon les normes (A.S.T.M, AFNOR). (Houben, 2006).....	10
Tableau II. 1: Définitions des viscosités.....	34
Tableau II. 2: Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériaux (Banfill, 2003).	38
Tableau III. 1: La composition granulométrique du sable préparé.....	55
Tableau III. 2: Les fractions de chaque type de sable utilisé.....	55
Tableau III. 3: Tamis utilisés pour le tamisage du sable	56
Tableau III. 4: Module de finesse du sable.....	57
Tableau III. 5: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E.S.V et E.S.P.....	59
Tableau III. 6: Masse volumique apparente du sable d'Oued Souf.	60
Tableau III. 7: Masse volumique absolue du sable d'Oued Souf.....	61
Tableau III. 8: La porosité, la compacité et l'indice des vides pour le sable d'Oued Souf.	62
Tableau III. 9: Composition des fractions du gravier en %.....	62
Tableau III. 10: Les tamis utilisés pour le tamisage du gravier (3/8 - 8/15).....	63
Tableau III. 11: La masse volumique apparente du gravier (3/8) et (8/15).....	66
Tableau III. 12: La masse volumique absolue du gravier (3/8) et (8/15).	67
Tableau III. 13: Porosité, compacité et indice des vides du gravier (3/8) et (8/15).....	67
Tableau III. 14: Estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient L_A	68
Tableau III. 15: Degré d'absorption d'eau des agrégats (8/15).	69
Tableau III. 16: Composition chimique de la pouzzolane.....	70
Tableau III. 17: Propriétés physiques de la pouzzolane.	70
Tableau III. 18: Analyse chimique du laitier de haut fourneau.	71
Tableau III. 19: Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau.	71
Tableau III. 20: Analyse chimique du verre.	72
Tableau III. 21: Propriétés physiques du verre.....	72
Tableau III. 22: Composition chimiques de la fumée de silice.	72
Tableau III. 23: Caractéristiques physique de la fumée de silice.	72
Tableau III. 24: Les caractéristiques du superplastifiant (MEDAFLOW 30).	74
Tableau III. 25: Les propriétés du superplastifiant sur les bétons.	75
Tableau III. 26: Données de base pour le BAP à base d'un sable préparé.....	76
Tableau III. 27: Données de base pour le plan d'expérience.	76
Tableau III. 28: La composition des BAP à base du sable préparé.	78
Tableau III. 29: La construction du plan d'expérience.	78
Tableau III. 30: Les mélanges préparés pour le plan d'expérience.....	79
Tableau III. 31: La composition des BAP utilisés pour le plan d'expérience.....	80
Tableau III. 32: Les essais de caractérisation des BAP à l'état frais.	82

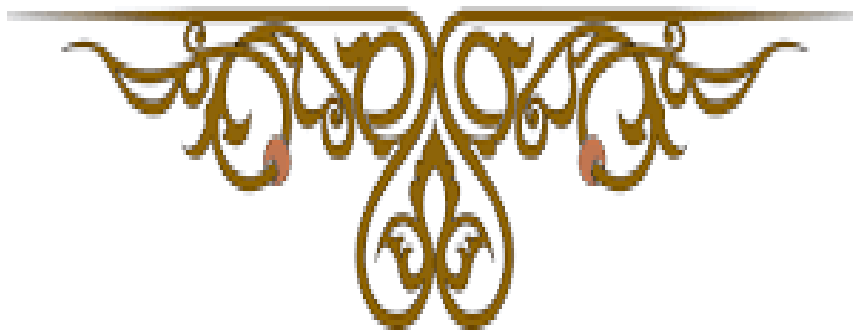
Tableau IV. 1: Les propriétés physiques des différents types des BAP _{SP}	93
Tableau IV. 2: Les paramètres rhéologiques des différents types de BAP _{SP}	95
Tableau IV. 3: Evolution de la résistance à la compression du BAP _{SP} au cours du temps.....	97
Tableau IV. 4: Taux d'évolution partiel des réponses mécaniques des btons formulée.....	98
Tableau IV. 5: Evolution de la résistance à la flexion des BAP _{SP}	99
Tableau IV. 6: La résistance à la compression obtenue par l'essai au scléromètre.....	100
Tableau IV. 7: La vitesse de propagation des ultra son pour les BAP _{SP}	101
Tableau IV. 8: Les propriétés des BAP _{PX} à l'état frais.....	103
Tableau IV. 9: La variation de la résistance à la compression des mélanges.....	107
Tableau IV. 10: La vitesse de propagation du son des 26 mélanges des BAP _{PX}	109
Tableau IV. 11: Les caractéristiques rhéologiques des mélanges de BAP _{PX}	111
Tableau IV. 12: Sommaire statistique des modèles pour le seuil de cisaillement.....	114
Tableau IV. 13: Ecart entre valeurs actuelles et valeurs prévues selon modèle de seuil de cisaillement.	117
Tableau IV. 14: Sommaire statistique des modèles pour la viscosité.....	118
Tableau IV. 15: Ecart entre valeurs actuelles et valeurs prévues selon le modèle de viscosité.....	121
Tableau IV. 16: Ecart entre valeurs actuelles et valeurs prévues selon modèle de la résistance à la compression à 28 jrs.....	124

Les notations

BAP : Béton autoplaçant	ρ_{app}, ρ_{abs} : Masse volumique apparente et absolue
Sp : Sable préparé	P : Porosité
PZ : Pouzzolane	C : Compacité
LHF : Laitier de Haut Fourneau	e : Indice des vides
PV : Poudre de Verre	L_A : Coefficient de Los Angeles (%)
FS : Fumée de Silice	A : Degré d'absorption (%)
SP : Super Plastifiant	SSB : Surface Spécifique de Blaine
CPJ : Ciment Portland avec ajout	LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
ST : Sable Témoin	SF : Etalement au cône d'Abrams
SPZ : Sable avec Pouzzolane	PL : Boite en L
SLHF : Sable avec Laitier de HautFourneau	SR : Stabilisation au tamis
G/S : Rapport entre la masse des graviers et la masse du sable	γ : Déformation
E/L : Rapport entre la masse d'eau et la masse du liant	τ_0 : Seuil de cisaillement (Pa)
BT : Béton Témoin	μ : Viscosité plastique (Pa.s)
BPZ : Béton à base de sable avec Pouzzolane	τ : Contrainte de cisaillement (Pa)
BLHF : Béton à base de sable avec Laitier de Haut Fourneau	ED : Essais Destructifs
BAP_{sp} : béton autoplaçant à base du sable préparé	END : Essais Non Destructif
BAP_{xp} : Béton autoplaçant pour le plan d'expériences	R_c : Résistance à la compression
M_f : Module de finesse	M_f : Moment de flexion
ESV : Equivalent de Sable Visuel	I : Indice de rebondissement
ESP : Equivalent de Sable par Piston	V : Vitesse de son (m/s)



« INTRODUCTION GÉNÉRALE »



Introduction générale :

Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie avec les bétons autoplaçants (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. (Belghit 2009)

Le béton autoplaçant (BAP), « Self Compacting Concrete (SCC) en anglais », constitue une véritable révolution culturelle des bétons. Il se distingue par sa fluidité, sa déformabilité et sa facilité de mise en place sans vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et permet ainsi la réalisation de formes compliquées ou d'ouvrages à densité d'armatures élevée tout en présentant généralement des surfaces de meilleure qualité.

Le béton est qualifié d'autoplaçant lorsque le matériau final répond à certaines exigences à l'état frais et à l'état durci. Ainsi, sa formulation doit au moins contenir un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les conditions de maniabilité et de stabilité. (Nasri 2016).

Introduire de nouveaux produits dans la formulation (laitier de haut fourneau, pouzzolane), adapter des techniques de mise en œuvre avancées ou étudier les différentes performances des BAP, utiliser des matériaux alternatifs (poudre de verre, fumée de silice), viser une formulation meilleure à travers une combinaison optimale entre les différents constituants, tout cela reste un espace de recherche très large.

Objectifs :

Notre recherche vise deux objectifs, le premier est de faire une étude sur le sable qui est par définition un matériau inerte et qui participe seulement par son aspect physique au développement des réponses mécaniques, en revanche activer ce sable par introduction d'ajouts minéraux actifs dans sa composition granulométrique tout en préservant une granulométrie d'un sable normal pour répondre à la question : est-ce que cette nouvelle technique proposée peut produire un BAP avec des caractéristiques rhéologiques acceptables, une composition durable, et une résistance mécanique élevée malgré le faible dosage en ciment ?

Le deuxième objectif est de rechercher la bonne formulation des bétons Autoplaçants

par la variation des quantités de chaque constituants (le rapport G/S, la fumée de silice, dosage du ciment) et de voir l'effet sur la rhéologie des BAP et la résistance mécanique.

Une matrice d'essai des différentes formulations faisant objet de cette étude a été établi à l'aide d'une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ».

L'intérêt de cette étude consiste à :

- Déterminer les facteurs influents sur la composition des BAP.
- Optimisation des plusieurs mélanges d'un BAP.
- Modélisation et Prédiction du comportement mécanique et rhéologique d'un BAP.

Méthodologie du travail :

Le contenu du mémoire contient les chapitres suivants :

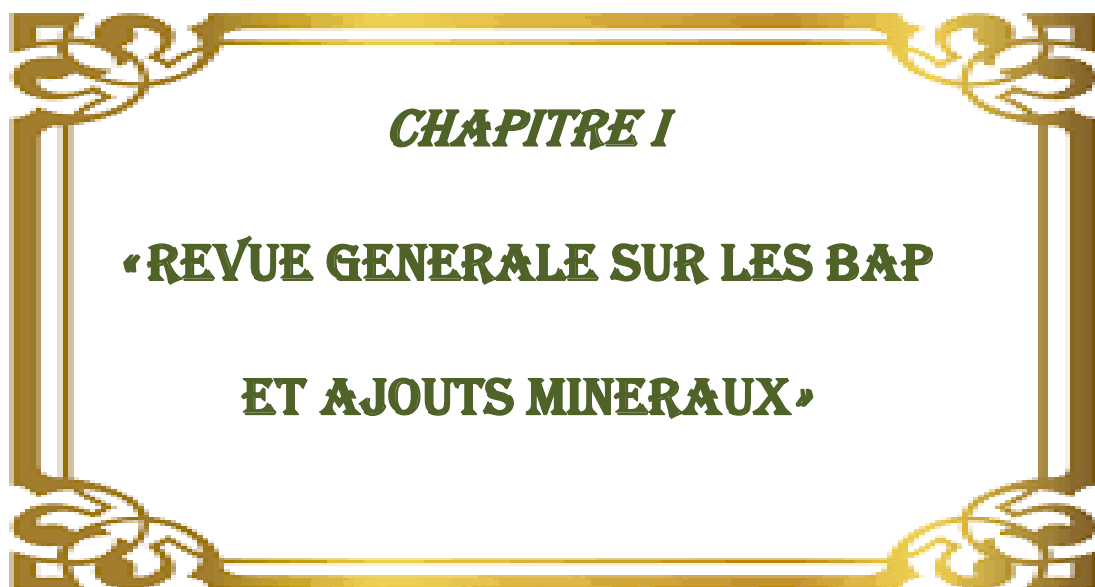
Chapitre I : Revue générale sur les BAP et les ajouts minéraux ;

Chapitre II : Rhéologie et modélisation ;

Chapitre III : Protocole des essais, matériaux utilisés et formulation ;

Chapitre IV : Résultats et interprétation ;

Chapitre V : Conclusion générale et perspectives.



CHAPITRE I
«REVUE GENERALE SUR LES BAP
ET AJOUTS MINERAUX»

Partie 1 : Généralités sur les Bétons Autoplaçants

I.1.1 : Introduction :

Le béton auto plaçant a été développé au Japon en 1988, il représente l'un des plus importantes avancées dans la technologie des bétons dans les dernières décennies.

L'utilisation des différents types de bétons innovants a créé une compétition entre eux et spécialement le béton Autoplaçants. Par définition les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique que : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité, obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité (Merniz, 2015)

I.1.2 : Généralités sur les BAP :

I.1.2.1 : Définition des BAP :

Le béton autoplaçant est un béton innovant qui ne nécessite pas de vibrations pour le placement et le compactage. Il est capable de s'écouler sous son propre poids, remplissant complètement le coffrage même en présence du renfort congestionné. Le béton durci est dense, homogène et possède des propriétés mécaniques plus grandes que celles assurées par le béton vibré traditionnel. (Benaïcha 2013)

I.1.2.2 Domaine d'utilisation des BAP :

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, surtout les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. (CIM béton, 2006)

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- possibilité de coulage dans des zones fortement ferraillées,
- possibilité de coulage dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles aux ouvriers,
- obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

I.1.2.3 Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant :

Les avantages des BAP sont : (Hamouine A, 2000)

- Rendements améliorés et exécution plus rapide.
- Réduction des nuisances sonores durant l'exécution.
- Qualité accrue des surfaces de béton.
- Réduction/suppression des travaux de ragréage.
- Facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante.

Par contre, la raison essentielle qui ne favorise pas l'utilisation des BAP est due au fait que l'utilisation de superplastifiant et de fines étant nécessaire, ceci se traduit par une augmentation du coût. (Laifa W, 2015)

I.1.2.4 : Intérêts techniques et impacts Socio-économiques :

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site
- une diminution de la pénibilité des tâches
- une réduction des risques d'accident

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont

concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation. Dans le cas d'un chantier, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain. (Projet National BAP)

I.1.3 : Les principaux constituants d'un béton autoplaçant :

Les constituants d'un BAP sont le ciment, les fines (les ajouts minéraux), les granulats (sable, gravier), eau et les adjuvants chimiques (superplastifiants). Voir schéma suivant (figure I.1).

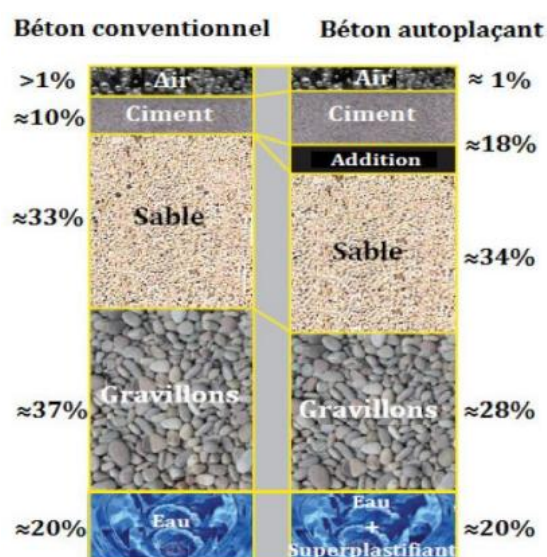


Figure I. 1 : La composition du béton autoplaçant et du béton conventionnel (Sheinn, A.M.M, 2007)

I.1.3.1. Le ciment :

a) Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui mélangée avec de l'eau. Forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium (Festa Jean et Dreux Georges 2007)

Tableau I. 1: Liste des différents types des ciments courants normalisé par la norme NF P 15-301.

Désignation	Types de ciment	de Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	----- ---	
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	L'un des Ajouts - 6 à 20 %	
CEM II /B		65 à 79 %	- 21 à 35 %	
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	- 35 à 65 %	
CEM III/B		20 à 34 %	Laitier - 66 à 80 %	0 à 5%
CEM III/C		5 à 19 %	- 81 à 95 %	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane, - 10 à 35 %	
CEM IV/B		45 à 64 %	ou fumée silice - 36 à 55 %	
CEM V/ A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	laitier - 18 à 30 % et cendre	
CEM V/ B		20 à 39 %	- 31 à 50 %	

I) Les classes du ciment :

En plus des valeurs caractéristiques des classes de résistance, la norme prévoit le respect de valeurs limites de résistance à la compression applicables à chaque résultat d'essai. Ces résistances sont mesurées sur « mortier normal » selon la norme NF EN 196-1.

Tableau I. 2: Les classes du ciment selon la norme NF EN 196-1.

Valeurs limites de résistance à la compression		
Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa	
	2 jours	28 jours
32,5 N	–	≥ 32.5
32,5 R	≥ 13.5	≥ 32.5
42,5 N	≥ 12.5	≥ 42.5
42,5 R	≥ 20	≥ 42.5
52,5 N	≥ 20	≥ 52.5

52,5 R

 ≥ 30 ≥ 52.5

I.1.3.2. Les granulats :

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0mm et 40mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées. Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton auto plaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines plus importants.

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm.(Yagoub.M, 2009)

Tableau I. 3:La classification des fractions de grains selon les normes (A.S.T.M, AFNOR). (Houben, 2006).

Type des grains	Diamètre max	Diamètre min
Cailloux	200 mm	20 mm
Graviers	20 mm	2 mm
Sables grossiers	2 mm	0.2 mm
Sables fins	0.2 mm	0.06 mm
Silts	0.06 mm	0.02 mm
Silts fins	0.02 mm	0.002 mm
Argiles	0.002 mm	0 mm

I.1.3.3. Eau de gâchage:

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.), une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton, cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats (Merniz, 2015).

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton, l'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent (Festa Jean et Dreux Georges 2007).

I.1.3.4. Additions minérales :

Une addition minérale est définie par la norme européenne EN 206-1 comme étant, un matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. D'après la norme précédente on a considéré deux types d'additions:

- Le type I : additions quasiment inertes contient (fillers, pigments...etc.).
- Le type II : additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent contient (cendre volante, fumée de silice...etc.).

I.1.3.5. Adjuvants (superplastifiants) :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Le mode d'action des superplastifiants est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport au béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant, à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12%, en fait ce pourcentage est généralement réduit de 15 à 25 % suivant le dosage (Festa Jean et Dreux Georges 2007)

I.1.4 : Modes de formulation des BAP :

Le grand problème de ce type de béton est de trouver une méthode de formulation, il existe plusieurs approches de formulation qui 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. (Assié S, 2004)

I.1.4.1 : Approche japonaise :

L'approche japonaise a été développée à l'université de Tokyo par Okamura, Ozawa et al.

En générale, cette approche consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pate de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Le volume du gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. L'optimisation des dosages des constituants de la pate de ciment est donc nécessaire pour s'assurer que le mortier obtenu (en associant le volume du sable) satisfasse les critères d'ouvrabilité de l'essai d'étalement au cône d'une part et de l'essai de l'écoulement à l'entonnoir d'autre part.

I.1.4.2: Approche CBI (suédoise) :

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (CementochBetongInstitutet) (Billberg P, 1999). Et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton.

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs (Ozawa K et al, 1992, Van B.K, 1994, Tangtermsirikul.S et al, 1995, Rilem, 2001) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats) et de la forme des granulats (roulé ou concassés).

Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pate, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

I.1.4.3: approche LCPC :

L'approche développée en France au LCPC par De Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible (Sedran T et al, 1999), (Larrard F, 2000 et 2002) qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides.

D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité

Pour un béton Autoplaçant, les grandeurs exigées à l'état frais sont un étalement au cône d'Abrams supérieur à 60cm, un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa, et une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (grandeurs rhéologiques mesurées au BTRhéom). Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas de ségrégation.

I.1.5 : Paramètres influençant la formulation des BAP :

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

I.1.5.1 : Un volume de pâte élevé :

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air) est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement, son volume est donc élevé (330 à 400 l/m³). (Turcry P, 2004), (Assié S, 2004)

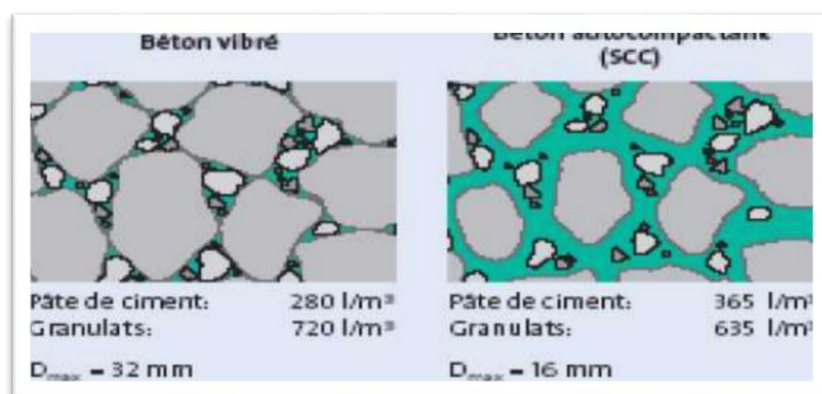


Figure I. 2: Dispersion des granulats par excès de pâte(Boukni.B,2007)

I.1.5.2 : Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante :

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 Kg/m³) pour limiter les risques de ressuage (figure I.3), et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (Assié S, 2004)

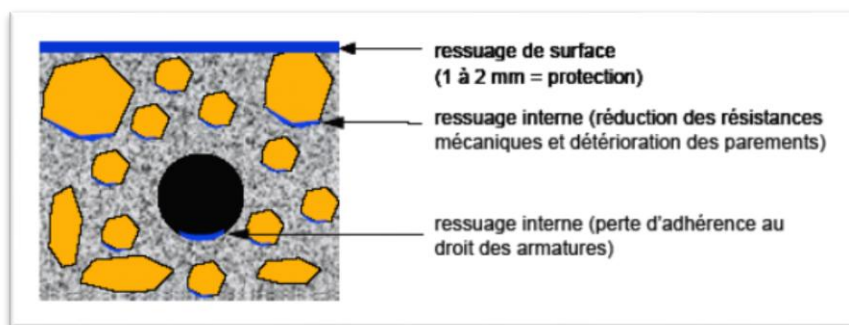


Figure I. 3: Phénomène de ressuage (Assié S, 2004)

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc. le filler étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence sur les caractéristiques mécaniques et autoplaçants du béton.

I.1.5.3 : L'emploi d'un superplastifiant :

L'apparition des bétons autoplaçant et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). (Benakli Sarah)

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculant, (Benakli Sarah); L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floes est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (Figure I.4). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles. (Hanaa F, 2009)

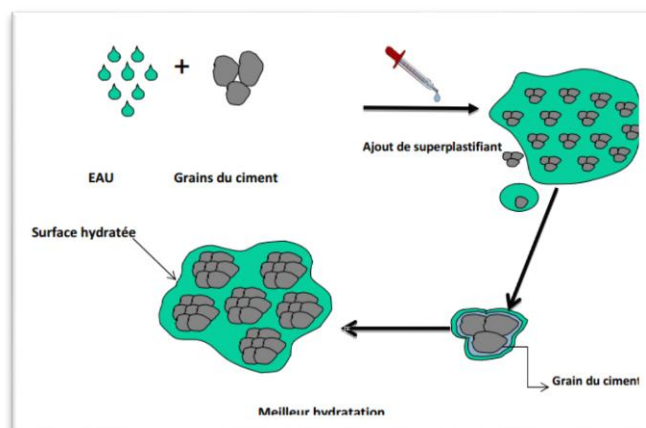


Figure I. 4: Action des superplastifiants, défloculation des grains de ciment. (Sedran T, 1999)

I.1.5.4 : Un faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{max} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

Partie 2 : les ajouts minéraux

I.2.1 : Introduction :

Les ajouts minéraux sont devenus un ingrédient essentiel et indispensable dans l'industrie du béton. Ce sont généralement des coproduits et des sous-produits de procédés industriels. Ils sont incorporés directement dans les centrales à béton lors de la confection des mélanges de béton ou broyés et mélangés conjointement avec le clinker pour produire des liants composés à matrice binaire, ternaire et même quaternaire. L'emploi des ajouts cimentaires contribue à améliorer la durabilité des bétons par leur action pouzzolanique et/ou hydraulique, à limiter l'utilisation des ressources naturelles pour la production de ciment et à réduire la teneur des gaz à effet de serre. Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés dans l'industrie du ciment et du béton, on retrouve : les cendres volantes, les laitiers de hauts de fourneau et la fumée de silice. (Chekireb, 2015)

Dans cette partie nous exposons les différents types des ajouts minéraux utilisés dans notre étude (laitier de haut fourneau, la pouzzolane, la fumée de silice) et comme déchets la poudre de verre.

I.2.2 : les ajouts minéraux :

Les ajouts minéraux sont des produits ultrafins composés de particules de très faible dimensions qui ajoutés au ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques.

I.2.2.1 : laitier de haut fourneau :

I.2.2.1.1 : Définition :

Le laitier est un silico-aluminate. Il a pour principal composant un mélange solide de $(2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2)$ $(2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2)$. Il provient de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte. Les matériaux enfournés sont le minerai de fer (gangue et oxydes de fer), le coke, le fondant (calcaire ou siliceux selon la nature de la gangue) et les éventuelles additions. Lors de la cuisson, après la fonte, le laitier est isolé par flottaison et s'écoule séparément. Lorsqu'il refroidit lentement à l'air, le laitier se présente sous la forme d'une roche cristalline. On peut le concasser et obtenir ainsi des granulats pour la construction.

Pour obtenir les propriétés hydrauliques qui lui permettent d'être utilisé comme liant, le laitier est refroidi brusquement dans l'eau : trempé, il n'a pas le temps de cristalliser. On obtient alors

le laitier granulé, qui est ensuite broyé pour être utilisable comme ajouts cimentaires. Le laitier broyé doit être conforme aux exigences de la norme CSA A23.5 (ASTM C 989).



Figure I. 5: Laitier de haut fourneau

I.2.2.1.2 : L'effet du laitier sur les caractéristiques des bétons :

➤ A l'état frais :

L'utilisation du laitier dans le béton permet d'améliorer l'ouvrabilité par rapport à un béton conventionnel (Manai. K, 1995) explique de phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'absorption d'eau par les grains de laitiers au début du malaxage.

(Venuat. M, 1989) Explique que les bétons contenant du laitier ont des temps de prise un peu plus longs que les bétons conventionnels, surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. Des recherches sur le sujet trouvent que l'addition du laitier favorise l'augmentation de la quantité totale et le taux de ressuage dans le béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut être expliqué par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise dans le béton. (Manai. K, 1995)

➤ A l'état durci :

Selon (Festa Jean et Dreux Georges 2007), les bétons avec le laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Ces bétons commencent à se rattraper au bout de sept jours à 20°C. Les particules de laitier <10 µm contribuent à la résistance à jeune âge (jusqu'à 28j), tandis que les particules entre 10 et 45 µm contribuent au développement des résistances ultérieures. Les particules >45µm ont de la difficulté à s'hydrater. Rapporte aussi que les laitiers permettent de réaliser des bétons résistant à l'action des eaux agressives, surtout en immersion compète.

Les mortiers aux laitiers sont de 10 à 100 fois moins perméable à l'eau que les mortiers de ciment portland. Un remplacement de 10% du ciment par le laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition. Les chercheurs montrent l'effet bénéfique des bétons aux laitiers sur la résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés, grâce à la réduction de la perméabilité, à la diminution de la chaux libre de la teneur en aluminat.

I.2.2.2 : La pouzzolane :

I.2.2.2.1 : Définition :

Le Terme Pouzzolane tire son nom de Pouzzoles, une localité près de Naples en Italie, riche en terre volcanique. La pouzzolane naturelle est une roche siliceuse légère produite par des projections volcaniques basaltiques. Elle comporte de la silice, de l'alumine, de l'oxyde ferrique (qui lui donne sa couleur rouge) faiblement aggloméré, friable dont la couleur varie du gris au rougeâtre généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Il est disponible sur le marché sous sa couleur d'origine, c'est-à-dire rouge brun, d'un diamètre allant de 4 mm à 40 mm, suivant sa destination dans le sol ou dans la préfabrication. Il existe également une variété grise, disponible en diamètre de 1 mm à 15 mm. (Kaddour B A & Benchenna 2017)

Les pouzzolanes sont définis comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possèdent des propriétés liantes. (Miller. E.W, 1993)



Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalin agrégats et du retrait au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.



Figure I. 6: La pouzzolane naturelle.

I.2.2.2.2 : Types de pouzzolane :

a- Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Amérique de Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le méta kaolin.

De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme (CSA A 3001), liants utilisés dans le béton (ASTM C 618).

b- Pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On distingue, soit des résidus de fabrication industrielle tel que le mach fers, cendre de bois ou d'houille, soit des débris de brique et de tuile fabriqués avec des argiles pures. On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite. (Macleod. F, 2005)

I.2.2.2.3 : L'effet de la pouzzolane sur les caractéristiques des bétons :

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

✓ A l'état frais :

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation. Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration. (Husson. S, 1991)

✓ A l'état durci :

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- ❖ Accroissement de la résistance finale.
- ❖ Légère diminution du retrait et du fluage.
- ❖ Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- ❖ Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- ❖ Protection des armatures contre la corrosion.
- ❖ Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- ❖ Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton.
- ❖ Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. En effet les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre.

Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance.

I.2.2.3 : La fumée de silice :

I.2.2.3.1 : Définition :

Selon la norme NF P 18-502 la fumée de silice est une Poudre amorphe divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage. (J.baron et J.ollivier, 1999)

Les fumées de silice FS sont un sous-produit industriel provenant de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de ferro-silicium. Les fumées de silice sont des produits lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Les fumées de silice sont recueillies par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion (DELAGRAVE A, 1996). Elle s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2000°C. Une fois refroidie, elles se condensent pour être captée dans des poches de tissu. Ensuite, elles seront traitées pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules.

Les FS sont de forme sphérique et de diamètre environ 100 fois plus petit que la dimension moyenne d'un grain de ciment, sont composées principalement de dioxyde de silicium amorphe. (Baron.J et Ollivier. J, 1992)

I.2.2.3.2 : Influence des FS sur les propriétés du béton :

✓ A l'état frais :

Les particules fines de fumée de silice agissent par leur effet filler en remplissant les microspores, ce qui conduit à une granulométrie plus étalée et une structure plus dense. Ceci libère l'eau qui a été emprisonnée dans les pores et permet une réduction de la demande en eau pour une consistance fixe. D'autre part, compte tenu de leur surface spécifique élevée, il peut y avoir une adsorption d'eau et par contre une augmentation de la demande en eau dépend du rapport E/L, de la présence de superplastifiant, de la teneur en ciment et de la concentration en fumée de silice.

Certains chercheurs ont montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 Kg/m³, on peut ajouter respectivement jusqu'à 2, 4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Ceci est attribué à l'amélioration du dosage supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines. Le béton devient très riche, très collant et très cohésif.

En générale, les fumées de silice réduisent considérablement les phénomènes de ressuage et de ségrégation, ce qui accélère la finition des surfaces. Toutefois pour les zones à taux d'évaporation élevés, le risque de formation des fissures de retrait plastique devient plus grand et l'application de produit de murissement sur la surface est alors nécessaire.

Avec l'utilisation des fumées de silice, le dosage en agent entraîneur d'air nécessaire pour obtenir un volume d'air désiré est plus élevé, surtout pour les faibles rapports E/C. les chercheurs explique ce phénomène par la surface élevée des particules, par l'augmentation de la viscosité du béton et par la présence de carbone sur les microsphères de fumée de silice.

Le temps de prise est prolongé en présence de la fumée de silice à cause de la réduction de l'énergie libérée durant les premières heures qui suivent la confection du béton.

✓ A l'état durci :

Les fumées de silice contribuent significativement au développement des résistances à la compression entre 7 et 28 jours avec un pouvoir liant de 3 à 4 fois supérieur à celui du ciment. Ceci est relié à une utilisation adéquate, c'est-à-dire en se servant de réducteurs d'eau et de superplastifiant pour compenser la demande en eau qui augmente pour une fluidité constante du béton.

Les fumées de silice améliorent aussi l'adhérence entre le béton et les armatures d'acier (ASTM C 234) par diminution du ressuage interne au niveau de l'interface béton-armature. Il y a formation d'une zone de transition dense. L'amélioration de l'adhérence est significative pour des additions de fumée de silice supérieures à 20%.

Rapporte qu'il peut y avoir une diminution du module d'élasticité pour un rapport E/L donné avec l'utilisation de la fumée de silice. Il trouve qu'une addition de plus de 7% de fumée de silice réduit les déformations par fluage durant les 4 premiers mois de l'âge du béton.

Presque tous les auteurs sont d'accord sur le rôle de la fumée de silice qui consiste à réduire la perméabilité du béton à l'eau et aux sels et augmenter la résistivité électrique. Ceci contribue à réduire le risque de corrosion des armatures. Les fumées de silice peuvent aussi neutraliser les réactions alcalis-granulats en augmentant le degré de polymérisation des C-S-H, ce qui réduit la mobilité des alcalis et des hydroxydes dans les solutions des pores.

L'introduction de la fumée de silice a peu d'effet sur le risque de carbonatation. L'effet est également minime dans le cas de la résistance aux cycles de gel-dégel avec des bétons de rapport E/L de 0,4 et des additions de fumée de silice de 15% ou moins. La résistance diminue pour des additions de 20 à 30% de fumée de silice et des rapports E/L variant de 0.36 à 0.55 (Manai K, 1995)

I.2.2.4 : La poudre de verre:

I.2.2.4.1 : Définition des déchets de verre :

Le verre est fabriqué à partir d'un mélange de carbonate de silice, le carbonate de sodium et de calcium, qui sont fondu à haute température, puis refroidi rapidement, un processus conduisant à la solidification sans cristallisation. Le verre est largement utilisé pour fabriquer des produits tels que le verre plat (vitres et pare-brise), récipients en verre (bouteilles et pots) etc. Tous ces éléments sont destinés à servir pour un temps limité, puis deviennent des déchets, ce déchet de verre peut être broyés pour produire des tailles de particules allant de fine poudre à plusieurs millimètres et ne peut donc être utilisé en tant que granulats ou ajouts en béton. (Scholze H, 1980)



Figure I. 7: Le déchet de verre.

I.2.2.4.2 : La poudre de verre dans les bétons :

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années (Abdalla, 2012; Idir et al, 2011; Jain et Neithalath, 2010; Schwarz et al, 2008; Shao et al, 2000; Shayan et Xu, 2004, 2006; C. Shi et Wu, 2005; Taha et Nounu, 2008a, 2008b; Zidol, 2009). Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

➤ **Propriétés à l'état frais :**

L'effet de la poudre de verre (PV) sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs, notamment, de sa finesse de mouture. (Zidol, 2009) a étudié l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un BAP ayant un rapport E/C = 0,4, l'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la viscosité plastique de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en superplastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre (Zidol, 2009). L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de SP requis pour un étalement donné.

Cependant, pour les besoins rhéologiques des BAP, une finesse supérieure à celle du ciment peut être appréciable, notamment pour le maintien de la stabilité. L'utilisation d'un agent de viscosité peut être négligée si la matrice contient un plus grand nombre de particules pour un volume donné.

➤ **Propriétés à l'état durci**

➤ **Propriétés mécaniques**

Il est démontré que la poudre de verre a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes (Schwarz et al. 2008). De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps. Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de PV en remplacement partiel du ciment (Abdalla, 2012; Aladdine, 2009; Schwarz et al, 2008; Shayan et Xu, 2004; Zidol, 2009).

Tout comme les cendres volantes, la PV n'a pas d'influence sur les résistances à jeune âge. Les résistances à la compression à 28 jours sont plus faibles par rapport à un béton de ciment Portland. Au-delà de 56 jours et jusqu'à 91 jours les résistances des bétons avec PV sont équivalentes, voire supérieures au béton témoin. En outre, le développement des résistances à la compression augmente avec la teneur en PV entre 28 et 91 jours (Zidol, 2009). En effet, des bétons à hautes performances ont été formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m³ et un rapport E/L de 0,40. L'incorporation de 20 % et 30 % de PV confèrent au béton un taux de

développement des résistances à la compression respectivement de 12 % et 18 %, alors que pour béton témoin, ce même taux est de 9 %.

(Shayan et Xu, 2006), ont étudié la performance de la poudre de verre comme un matériau pouzzolanique dans le béton. La finesse de la PV que les auteurs australiens ont utilisé est le double de celle du ciment GU, soit $800 \text{ m}^2/\text{kg}$. Les bétons étudiés sont formulés afin d'atteindre une résistance à la compression de 40 MPa à 28 jours. Le remplacement partiel du ciment est de 20 – 30 % de PV et 10 % de FS. Le béton témoin est dosé à $380 \text{ kg}/\text{m}^3$ de GU. Il s'avère qu'avec 20 % de PV, la résistance visée à 28 jours est atteinte. Cependant avec 30 % de PV ce n'est qu'à partir de 90 jours que la résistance atteint 55 MPa.

Par ailleurs, la poudre de verre peut être incorporée avec la fumée de silice pour produire des bétons à matrice ternaire. (Abdalla, 2012), a comparé les performances à l'état durci de quatre bétons ordinaires ayant un rapport E/L de 0,45. Trois d'entre eux contiennent différents ajouts cimentaires à savoir : ciment composé à base de 20 % PV + 5 % FS pour le premier mélange, TerC3 (20 % CV + 5 % FS) pour le second mélange et Tercem 3000 (22 % L + 5 % FS) pour le troisième mélange. Le quatrième mélange est formulé avec 100 % GU en guise de témoin.

La poudre de verre utilisée a une finesse de $440 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Ces résultats (Figure I.8) montrent que le béton ternaire à base de CV et le béton ternaire à base de PV ont des résistances à la compression similaires à tous les âges. Le béton ternaire avec L est comparable au témoin. Ce dernier résultat reste néanmoins particulier vu que le laitier est connu pour conférer au béton des résistances supérieures au témoin.

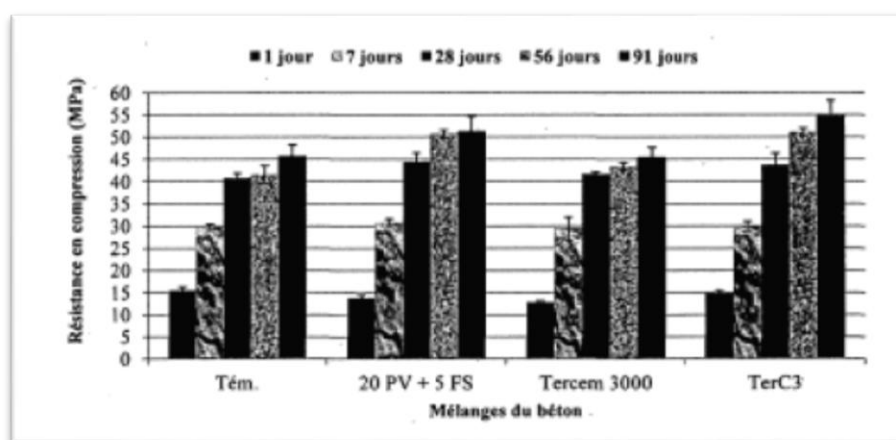


Figure I. 8: Résistance à la compression pour les bétons ternaires (Abdalla, 2012).

➤ **Réaction alcali-silice :**

La réaction alcali-silice (RAS) désigne la réaction chimique qui se produit entre les minéraux silicatés de certains granulats et les alcalis contenus dans la solution interstitielle du béton. Un gel expansif se produit et augmente de volume avec l'absorption de l'eau. Ce qui génère des désordres dans les bétons : fissuration, expansion et baisse des performances mécaniques.

L'incorporation du verre finement broyé aide à limiter les dégâts causés par l'alcali réaction de par ces propriétés pouzzolaniques. (Idir, 2009) a étudié l'action des fines et des granulats de verre sur la réaction pouzzolanique et la réaction alcali-silice. Il se trouve que plus la finesse du verre augmente plus la chaux est consommée. Ce qui résulte en une grande production de gel C-S-H contribuant ainsi à la densification de la matrice cimentaire et à la réduction de sa perméabilité. Néanmoins, il faut faire attention quant à l'utilisation des fines de verre pour lutter contre la RAS. En effet, ces fines peuvent apporter à la solution interstitielle une certaine quantité en alcalins entraînant le dépassement du seuil limite au-delà duquel les granulats peuvent réagir de manière néfaste (Idir, 2009).

De même, dans une étude antérieure, (Shayan et Xu, 2004) ont montré que l'utilisation des granulats de verre peut provoquer la réaction alcali-silice, alors que l'utilisation du verre sous forme de poudre contribue à contrer l'expansion des granulats (Figure I.9).

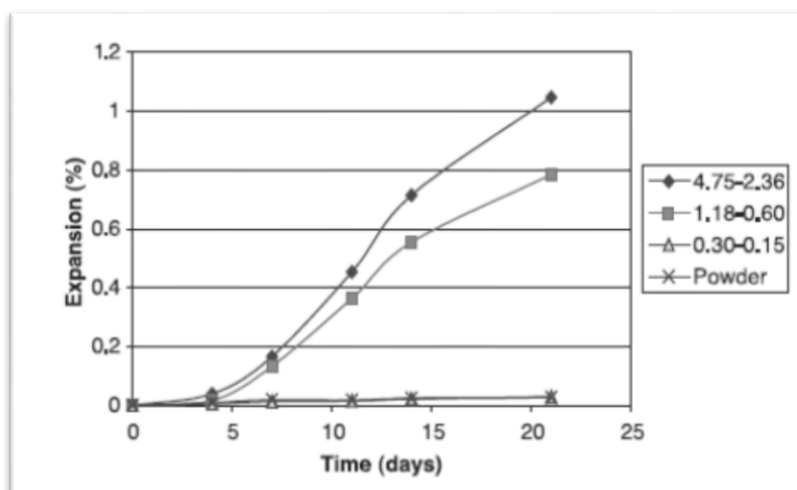


Figure I. 9: Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (Shayan et Xu, 2004)

➤ **Réaction pouzzolanique du verre :**

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur l'éprouvette de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de

chaux. Ou encore tests de consommation de chaux notamment par : l'essai chapelle, ATG et DRX.

Il a été difficile, voire impossible de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- 1- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont finis, meilleure et son activité pouzzolanique.
- 2- La résistance des mortiers et béton diminue à mesure que leur teneur en verre augmente.
- 3- L'activité pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leurs couleurs, le verre brun est le verre qui possède la plus faible d'activité. Par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable.

➤ **Comparaison du verre à d'autres pouzzolanes :**

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines. Lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenu suffisant, en effet, dans le cas du verre, celui apporte lui-même les alcalins nécessaire au déclencheur de la réaction. Par exemple, une substitution de 30% du ciment dans les bétons affiche une meilleur résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante (Kojima, T 200). Les travaux de (Shi et al, 2005), viennent confirmer également cette tendance.

Ces auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle de mortiers confectionnés avec de la cendre volante (Shi et al, 2005). Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante.

Conclusion :

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant. Il expose d'abord leur définition ainsi que leur développement, ce chapitre fait une synthèse sur la description des constituants entrant dans la fabrication des BAP et les caractéristiques, il me donne les avantages apportés par les BAP. Et la deuxième partie contient des notions générales sur les ajouts minéraux tel que le laitier de haut fourneau, la pouzzolane, la fumée de silice, la poudre de verre. Ainsi leur influence sur les bétons spécialement le BAP.



CHAPITRE II
« RHEOLOGIE ET
MODÉLISATION »

Partie 01 : La rhéologie des BAP

II.1.1 : Introduction :

Le temps pendant lequel le béton reste frais est insignifiant par rapport à sa durée de vie totale. Pourtant, au cours de ce temps, beaucoup d'opérations s'effectuent : malaxage, transport, mise en place, serrage, etc. Ces opérations, dépendant notamment du comportement rhéologique des bétons, influencent en fait la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, apparence des parements, étanchéité, etc. Ainsi, l'étude du comportement rhéologique des bétons présente un grand intérêt industriel.

Malgré toute son importance, l'étude du comportement rhéologique des bétons est peu avancée aujourd'hui; cela est dû en grande partie à la complexité de ce matériau, qui présente une forte hétérogénéité. La caractérisation rhéologique des bétons frais reste donc toujours au niveau empirique. Avec l'apparition des nouveaux bétons fluides, l'insuffisance des moyens existants pour caractériser les bétons frais devient manifeste. De nouvelles caractérisations adéquates sont donc fortement demandées.(Chong 1995)

En général, la stabilité rhéologique des bétons autoplaçants est assurée par l'utilisation des additifs organiques (super plastifiants et agent colloïdal) et minéraux (fillers)(Assie S, 2004). En effet, l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants permettent d'améliorer la fluidité et la viscosité (FerrarisC.F, 2001). Toutefois, le comportement rhéologique de ces bétons qui se diffère d'un béton ordinaire, reste mal connu et dépend de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, la formulation et la méthode utilisée sont des facteurs essentiels.

Dans ce travail, on effectuera d'abord une synthèse des connaissances actuelles de la rhéologie dans le domaine de génie civil. Il s'agit des définitions de base des paramètres qui interviennent sur le comportement rhéologiques (le seuil de cisaillement τ_0 la viscosité plastique μ) ou bien des notions fondamentales de rhéologie.

II.1.2 : Définition de la rhéologie :

La rhéologie est une branche de la mécanique des milieux continue qui étudie l'écoulement et la déformation de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée. Elle permet de déterminer une relation entre la contrainte, la déformation et le temps à travers des modèles ou des lois mathématiques.

Le but de l'étude du comportement rhéologique d'un fluide est d'estimer le système de forces nécessaires pour causer une déformation spécifique, ou la prédiction des déformations causées par un système de force spécifiques.

II.1.3 : Comportements rhéologiques :

La rhéologie est utilisée dans plusieurs domaines industriels, notamment les matériaux cimentaires (pâte, mortier et béton de ciment) afin de comprendre et d'identifier leur comportement à l'état frais. Le comportement rhéologique des matériaux cimentaires est variable et dépend de la composition de la pâte (type de liant, adjuvant chimique, rapport E/L), de la nature et de la teneur des granulats (sable, gros granulats), des différentes interactions entre les particules (colloïdales, hydrodynamiques, frictionnelles...etc.) Et des conditions expérimentales. À travers la littérature (Coussot, 2012; Shaughnessy et Clark, 1988; Wallevik, 2006), on peut classer les fluides selon leurs comportements rhéologiques (Figure II-1). À savoir que les matériaux cimentaires sont considérés comme des suspensions de particules de tailles différentes dans un fluide de viscosité variable.

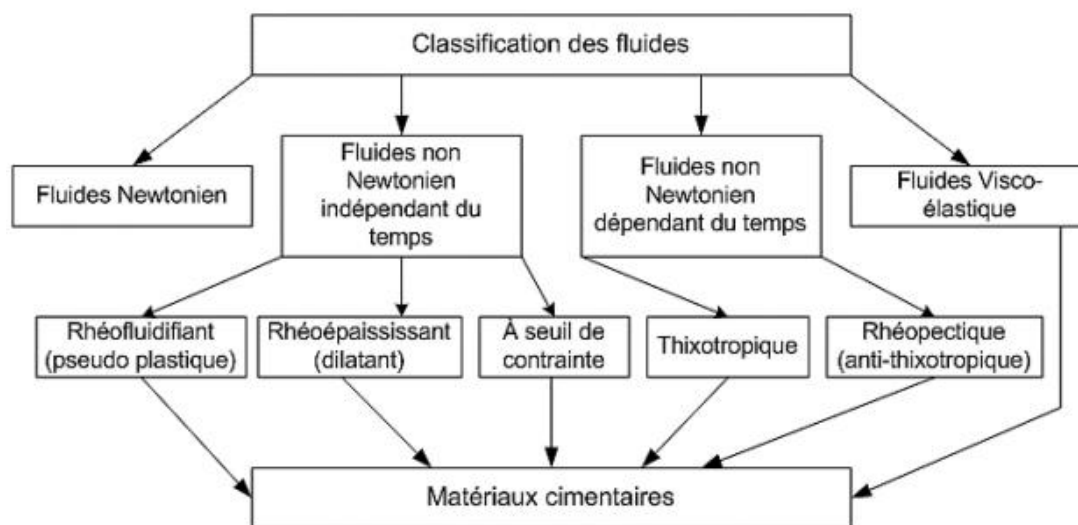


Figure II. 1: Classification des fluides selon leur comportement rhéologique

➤ **Quelques définitions :**

- **Fluide Newtonien :**

On appelle liquide Newtonien un fluide dont le rapport entre la contrainte de cisaillement à la vitesse de déformation reste constant. Ce rapport exprime la viscosité, elle est indépendante du cisaillement.

- **Rhéofluidifiants ou pseudo-plastique:**

Un fluide est dit rhéofluidifiant quand la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement.

- **Fluide à seuil :**

On appelle un fluide à seuil quand il nécessite une contrainte minimale au-delà de laquelle il peut s'écouler.

- **Fluides viscoélastiques :**

La viscoélasticité linéaire caractérise un comportement intermédiaire du matériau entre un solide élastique de Hooke (les déformations sont proportionnelles aux contraintes) symbolisé par un ressort de module E (ou G) et un fluide visqueux Newtonien (vitesses de déformations proportionnelles aux contraintes) symbolisé par un amortisseur de viscosité μ . L'élasticité d'un matériau traduit sa capacité à conserver et restituer l'énergie après déformation, la viscosité traduit sa capacité à dissiper l'énergie.

II.1.4 : Définition des propriétés rhéologiques :

II.1.4.1 : Le taux de cisaillement :

Lorsque le fluide s'écoule en régime laminaire comme le cas d'un écoulement couette, la répartition des vitesses dans l'entrefer suit une loi linéaire entre deux plans parallèles, dont l'un se déplace à une vitesse constante et l'autre est stationnaire. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans.(Taleb 2017)

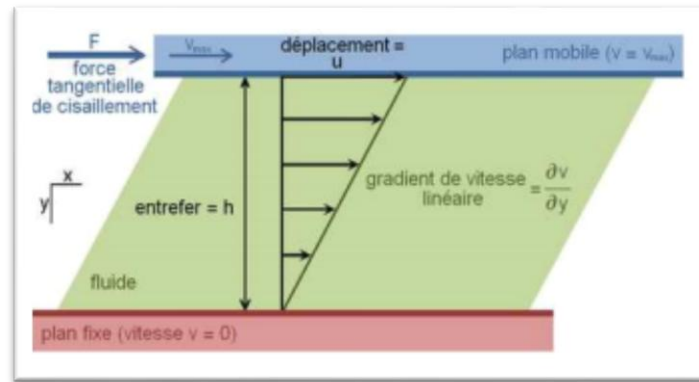


Figure II. 2: Ecoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan.

Le déplacement (γ) entre les deux plans est défini comme la déformation :

$$\gamma = \frac{dx}{dy} \quad (1.2)$$

Le taux de cisaillement ou la vitesse de déformation ($\dot{\gamma}$) en (s^{-1}) est définie comme la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent définie comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{d}{dy} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dy} \quad (1.3)$$

II.1.4.2 : La viscosité :

Pour déplacer une suspension granulaire cela exige d'effectuer un effort, ce qui signifie qu'une déformation macroscopique d'un fluide nécessite lors du déplacement de ses éléments de vaincre des résistances internes locales. Ces résistances internes, appelées aussi dissipations visqueuses, sont engendrées par le mouvement du liquide interstitiel dans la porosité d'un système granulaire, par frottement. Le travail des résistances internes lors des déplacements relatifs des éléments s'écrit en première approximation τb^3 où b est la distance moyenne entre les centres de deux éléments et τ la contrainte appliquée. Pour un matériau granulaire, le résultat macroscopique des dissipations est en fonction de la teneur en solide et de la contribution des classes granulaires à la compacité d'ensemble (Coussot et Ancey, 1999). Ces dissipations d'énergie sont traduites par la viscosité apparente (Tableau II.1) de la suspension. Celle-ci est fortement influencée par les conditions et les durées de sollicitations et de cisaillements.

Tableau II. 1: Définitions des viscosités.

Type de viscosité	Définition	Expression	Dépendance
viscosité dynamique η	Résistance au mouvement due aux frottements moléculaires internes, résistance que les molécules de ce fluide opposent aux forces de dissociation et au mouvement	Pour un fluide idéal, la loi de Newton donne : $\tau = \eta \dot{\gamma}$ (en Poiseuille ou Pa.s). Pour les fluides dits non-Newtoniens la grandeur est la viscosité apparente	Essentiellement de la cohésion et du taux de transfert de quantité de mouvement entre les molécules
viscosité cinématique ν	Doit son origine à l'utilisation des viscosimètres capillaires utilisant le temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur, qui intègre la masse spécifique de la substance	Temps d'écoulement proportionnel à $\nu = \eta/\rho$ avec ρ la densité du liquide et η sa viscosité (en Stokes ou m^2/s)	De la densité du liquide et de sa viscosité
viscosité relative η_R	Correspond au rapport de la viscosité dynamique de cette solution sur la viscosité dynamique du solvant	$\eta_R = \eta/\eta_S$	
viscosité spécifique η_{SP}	Correspond à la viscosité d'une dispersion colloïdale diluée de particules sphériques	$\eta_{SP} = \eta_R - 1$	

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

Elle correspond à la pente de la droite donnant la variation du taux de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement (Figure II.3).

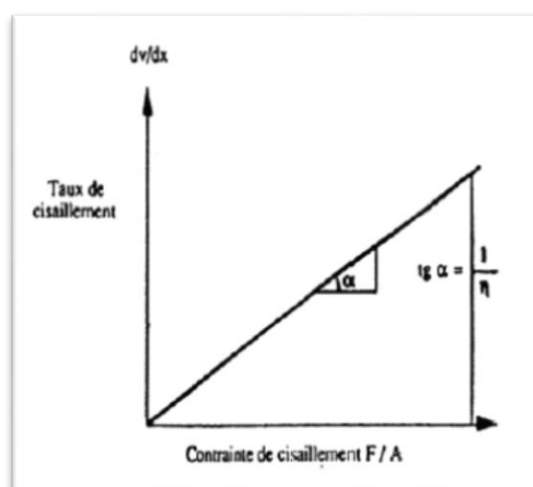


Figure II. 3: La viscosité plastique.

La viscosité plastique dépend de la force intermoléculaire qui empêche le déplacement des particules les unes par rapport aux autres et rend l'écoulement plus difficile (Khayat, 1992 cité par Charbel, 2008).

II.1.4.3 : Le seuil de cisaillement :

Par définition, le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas.

Le seuil de cisaillement dynamique τ_0 correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse, et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse, à partir de l'équation du modèle (El Barrak et col, 2004).

II.1.5:La thixotropie et anti thixotropie :

II.1.5.1 : Thixotropie:

La thixotropie est la propriété d'un matériau qui, après application d'une contrainte ou d'une vitesse de cisaillement, constante, voit sa viscosité décroître en fonction du temps ou de la durée de l'écoulement. Puis, après un temps de récupération assez long, le système retrouve son état initial (phénomène réversible). Finalement, le comportement thixotrope concerne les corps plastiques et pseudo-plastiques rhéofluidifiants (fluides non Newtoniens) et le caractère thixotrope est un comportement dépendant du temps car les modifications de structures microscopiques ne sont pas instantanées. Les manifestations de ces divers phénomènes sont visibles dans les tracés de rhéogrammes, tels les hystérésis. Si on applique des vitesses de cisaillement assez fortes pendant assez longtemps, la structure est modifiée durablement lors de la charge et le comportement du matériau est affecté donnant un rhéogramme de décharge différent. Lorsque le matériau ne retrouve pas l'intégralité de l'état initial, on parle de thixotropie partielle.

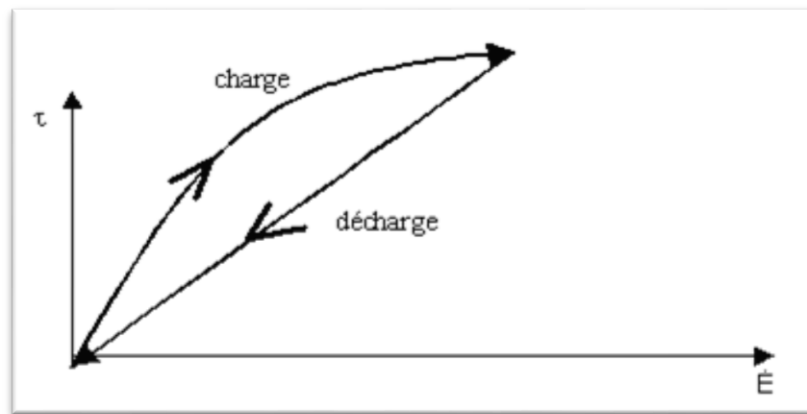


Figure II. 4: le corps thixotropie.

II.1.5.2 :L'Anti thixotropie :

La rhéopéctie est le contraire de la thixotropie. Il s'agit d'un épaissement de la préparation en fonction de la durée de cisaillement. Le gel d'hydroxyde de magnésium USP présenterait un tel comportement.

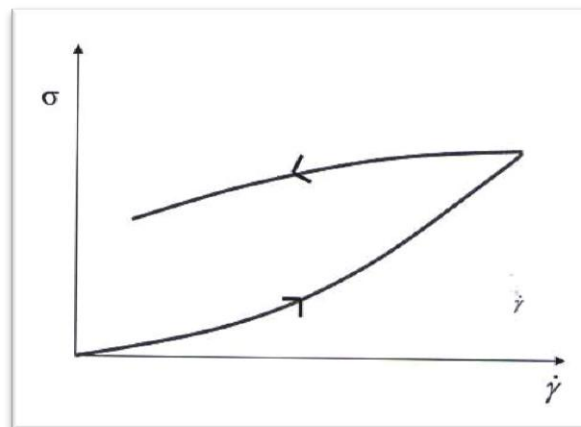


Figure II. 5: Système présentant un Anti thixotropie

II.1.6: Différents types de modèles d'écoulement appliqués aux bétons :

On considère que le comportement des bétons à l'état frais s'apparente à celui d'un fluide viscoplastique à seuil et suit le modèle de Bingham

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$$

Avec

τ_0 : le seuil de cisaillement exprimé en (Pa)

η : la viscosité plastique exprimé en (Pa.s)

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse de cisaillement exprimé en (s^{-1})

Cependant, ce modèle ne permet pas toujours de modéliser l'écoulement des BAP (De larrard, 1999, cité par El Hilali, 2009). En effet son utilisation peut conduire à l'obtention de seuils d'écoulements négatifs, pour éviter ce genre de résultat Ferraris et col. (1998) ont proposé le modèle de Bingham modifié basé sur le modèle de Hershel-bulkley mais ne contenant que deux caractéristiques rhéologiques indépendantes.

$$\tau = \tau_0 + K (\dot{\gamma})^n$$

Avec K : le coefficient de viscosité

n : l'indice de viscosité

En variant la constante n et le seuil de cisaillement τ_0 , on peut tenter d'exprimer d'autres modèles de comportement rhéologique par exemple si $n=1$ le fluide a un comportement de Bingham.

On représente schématiquement dans la Figure II.3, les courbes d'écoulement (évolution du gradient de vitesse en fonction de la contrainte) associées aux lois décrites ci-dessus.

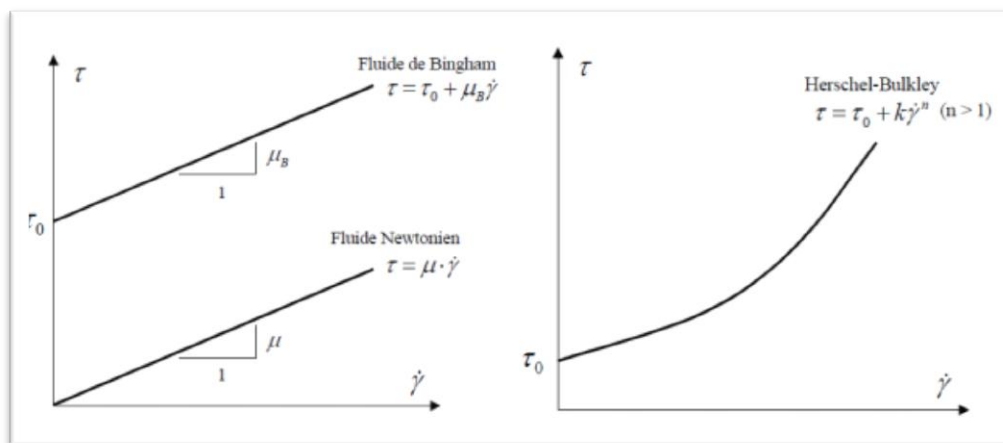


Figure II. 6: Les différents types de modèles d'écoulement.

Sedran (1999) a montré que le modèle de Herschel-Bulkley donne une bonne description du comportement rhéologique des bétons autonivelants en utilisant le rhéomètre BTRhéom. Mais l'utilisation de ce modèle est coûteuse en temps et en techniques d'expérience car elle nécessite l'identification des trois paramètres τ_0 , K et n .

Les rhéomètres permettent de mesurer des couples ou directement le seuil de cisaillement statique de la suspension. Ils permettent aussi d'établir les courbes

d'écoulements des bétons testés. A partir de ces courbes d'écoulement on peut calculer les différents types de viscosité et déduire le type de comportement du béton. Le tableau II.2 représente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériaux (Banfill, 2003).

Tableau II. 2: Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériaux (Banfill, 2003).

	Pâte	mortier	BAP	BO
Seuil de cisaillement τ_0(Pa)	10-100	80-400	50-200	500-2000
Viscosité plastique μ (Pa.s)	10^{-2} -1	1-3	20-100	50-100

II.1.7: Rhéologie des BAP :

Dans certains cas, la contrainte de cisaillement $\tau(r)$ peut être inférieure au seuil de cisaillement du matériau τ_0 dans une portion non négligeable de l'entrefer de la géométrie. Dans ce cas, le matériau ne s'écoule que dans une zone à proximité du cylindre interne. Ce phénomène, généralement distingué dans une géométrie à entrefer large, induit à un cisaillement hétérogène et cause de l'apparition d'une zone non cisailée appelée aussi la zone morte.

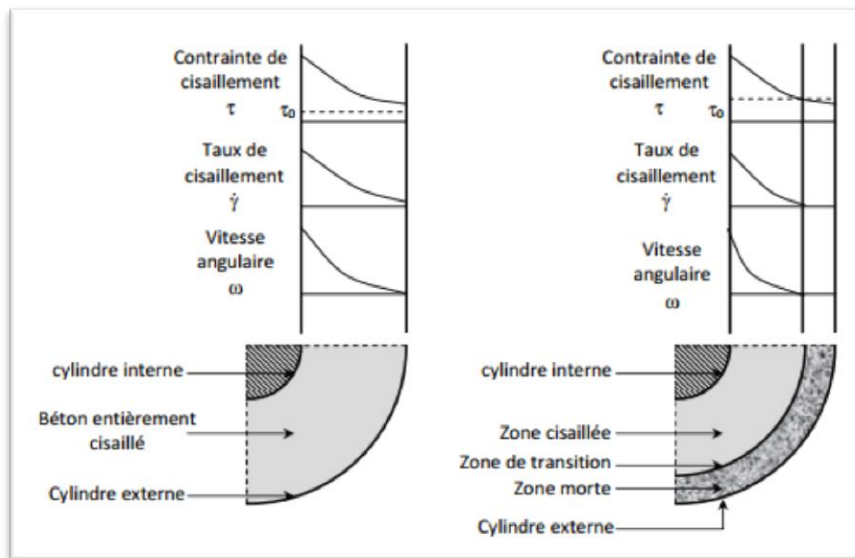


Figure II. 7: Ecoulement d'un fluide Binghamien dans un rhomètre à cylindres coaxiaux

(a) Sans zone morte (b) avec zone morte (Koehler et al, 2004)

Le matériau dans la zone morte est soumis à des contraintes de cisaillements inférieures à son seuil de cisaillement et donc ne s'écoule pas. Le taux de cisaillement et la vitesse

angulaire sont nulles au niveau du rayon de la zone de transition entre le matériau et la zone morte (figure II.7).

Pour un béton autoplaçant caractérisé par un seuil de cisaillement proche de zéro, l'erreur due au fait de négliger la zone morte est proche de zéro (figure II.8), ce qui n'est pas le cas des bétons fermes (Koehler et al, 2004).

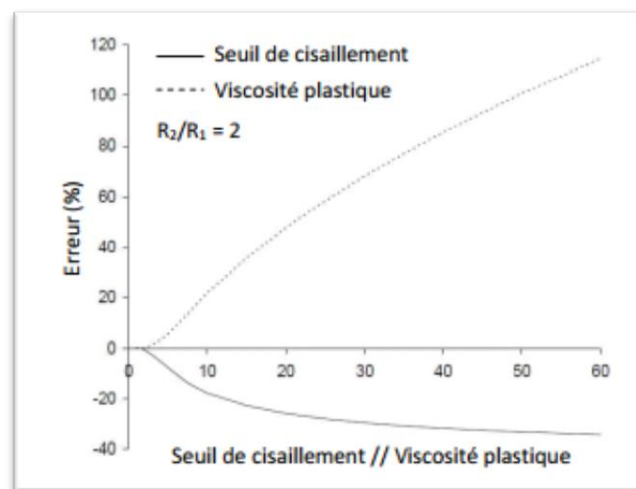


Figure II. 8: Influence du rapport seuil de cisaillement/ viscosité plastique sur l'erreur due à la négligence de la zone morte (Vitesse de rotation= 10 rpm à 60 rpm) (Koehler et al, 2004).

II.1.8 : Rôle des constituants :

Le béton autoplaçant est un mélange biphasique homogène. Il est composé de ciment, d'ajouts minéraux, d'adjuvants chimiques, d'air et d'eau formant la phase cimentaire; de sable (particules de 0 à 5 mm) et de gros granulats (particules de 5 à 20 mm) formant la phase granulaire. Chacun de ces constituants a une influence sur le comportement rhéologique aussi bien à l'échelle de la pâte qu'à celle du BAP, mais aussi sur les propriétés à l'état durci du béton. Dans les paragraphes suivants, nous exposons le rôle des différents constituants à l'échelle de la pâte de ciment et à l'échelle du BAP.

II.1.8.1: À l'échelle de la pâte :

La littérature regorge d'études sur les facteurs qui influencent l'écoulement de la pâte. Le but principal de la majorité de ces études est de comprendre le comportement rhéologique de la matrice cimentaire afin de prédire le comportement rhéologique du béton à travers la corrélation entre les différents paramètres de formulation et de mesure (Ferraris et al, 2001; Hidalgo et al, 2009; Perrot et al, 2012; Sant et al, 2008; Schwartzentruber et al, 2006; Vikan et al, 2007).

Cela permet aussi d'isoler la rhéologie de la pâte et de mieux comprendre les interactions qui existent entre les poudres (ciment et ajouts minéraux) l'eau et les adjuvants chimiques. Ces derniers n'ont pas une action sur les granulats. L'intérêt d'étudier la rhéologie des pâtes de ciment peut être résumé dans les quatre points suivants (Papo, 1988) :

- 1) Afin de fournir un outil utile pour contrôler la production de ciment ;
- 2) Pour obtenir un moyen de prédire l'influence des additifs chimiques sur le comportement du béton ;
- 3) Pour obtenir des informations complémentaires sur la chimie du ciment ;
- 4) Pour des applications particulières, telles que les injections de coulis de ciment.

Par ailleurs, la pâte de ciment est une solution hautement concentrée de particules solides. Son comportement rhéologique est influencé par plusieurs facteurs tels que (Papo et Piani, 2004; Vikan et al, 2007):

- Rapport E/L ;
- Composition chimique et minéralogique du ciment ;
- Temps d'hydratation et changements structuraux liés à la cinétique d'hydratation ;
- Réactivité chimique des ajouts minéraux ;
- Distribution granulométrique, densité, finesse Blaine, forme géométrique et texture de la surface des poudres (ciment et ajouts minéraux) ;
- Propriétés des adjuvants chimiques ;
- Conditions de malaxage : type de malaxeur, vitesse et durée de malaxage ;
- Conditions de mesure : instruments, procédures expérimentales, température, humidité.

➤ **Rôle du rapport E/L :**

Les chercheurs s'accordent sur le fait que plus le rapport E/L est élevé plus le seuil de cisaillement et la viscosité apparente diminuent (Cyr et al, 2000; Feys et al, 2009; Nehdi et Rahman, 2004; Wong et Kwan, 2008; Yahia et al, 2005). En effet, l'effort nécessaire pour l'écoulement de la pâte diminue avec l'augmentation de la teneur en eau, la pâte est plus fluide.

(Cyr et al, 2000) ont étudié l'effet des superplastifiants sur le comportement rhéoépaississant des pâtes de ciment contenant ou pas des ajouts minéraux. Dans un premier temps, les auteurs ont comparé le comportement rhéologique des pâtes sans superplastifiants, ils ont fait varier le rapport E/L de 0,30 à 0,48. L'équation de Herschel Bulkely est utilisée pour caractériser la rhéologie des pâtes. Les courbes d'écoulement des pâtes (Figure II.9) montrent que l'augmentation du rapport E/L entraîne la diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique.

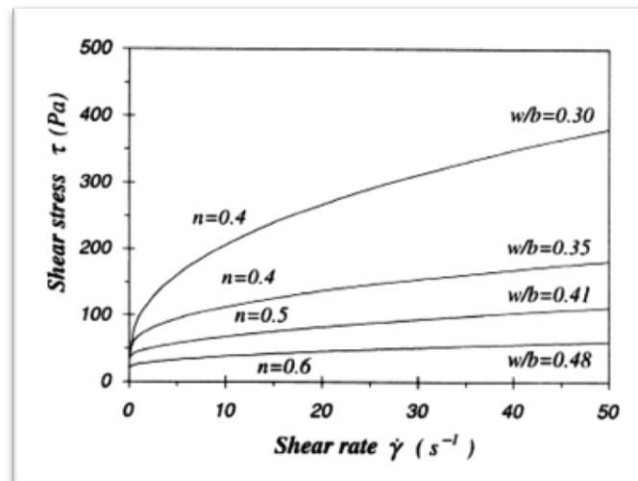


Figure II. 9: Courbe d'écoulement des pâtes de ciment sans superplastifiant (Cyr et al, 2000)

➤ Rôle des caractéristiques du ciment :

La surface spécifique du ciment influence les paramètres rhéologiques des pâtes. Pour un rapport E/C constant, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique augmentent linéairement avec l'augmentation de la surface spécifique Blaine (Lapasin, 1979). Ce constat est confirmé par l'étude de (Chen et Kwan, 2012). Ces auteurs ont évalué l'efficacité de l'addition de ciment très fin sur la compacité granulaire et la rhéologie des pâtes à base de ciment Portland. La Figure II-5 représente la granulométrie des deux ciments utilisés, le ciment Portland ordinaire (OPC) d'une finesse Blaine de 326 m²/kg et le ciment très fin (SFC) d'une finesse Blaine de 780 m²/kg (Chen et Kwan, 2012).

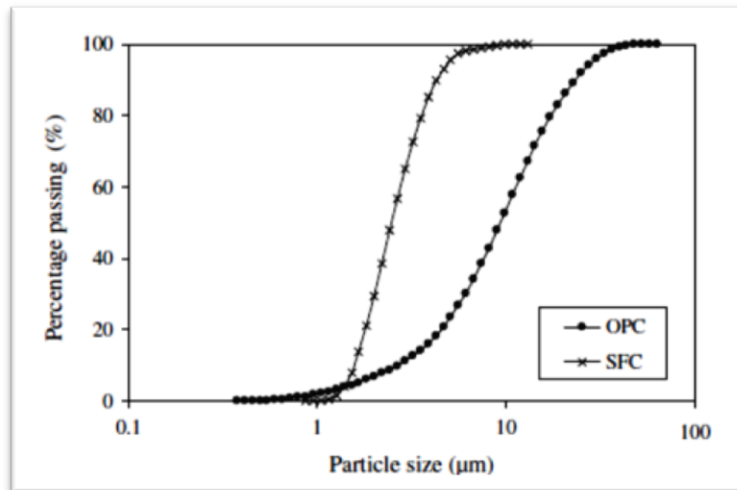


Figure II. 10: Distribution granulométrique du ciment portland ordinaire (OPC) et du ciment très fin (SFC) (Chen et Kwan, 2012)

➤ **Rôle des adjuvants chimiques :**

- **Superplastifiant :**

Comme leur nom l'indique, les superplastifiants (SP) servent à fluidifier et à disperser les grains de ciment qui ont tendance à flocculer dès leur contact avec l'eau de gâchage. De nombreuses études mettant l'accent sur l'influence des SP sur la rhéologie des systèmes cimentaires ont été effectuées. D'une façon générale, les SP agissent en augmentant la fluidité de la pâte, et en diminuant le seuil de cisaillement et la viscosité apparente (Hanehara et Yamada, 2008; Park et al, 2005; Uchikawa et al, 1995). Pour un dosage donné en SP à base de PNS, plus la quantité de molécules de SP adsorbé par les grains de ciment est petite plus l'écoulement de la pâte est grand (Kim et al, 2000).

Par ailleurs, le dosage en SP influence le comportement rhéologique des pâtes de ciment. (Cyr et al. 2000) ont analysé le comportement rhéologique des pâtes par l'équation d'HerschelBulkley. Une étude menée par (Park et al. 2005) montre une nette diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique des pâtes de ciment contenant 1-2 % de SP (en extrait sec de la masse totale du liant) en comparaison avec la pâte témoin (Park et al, 2005).

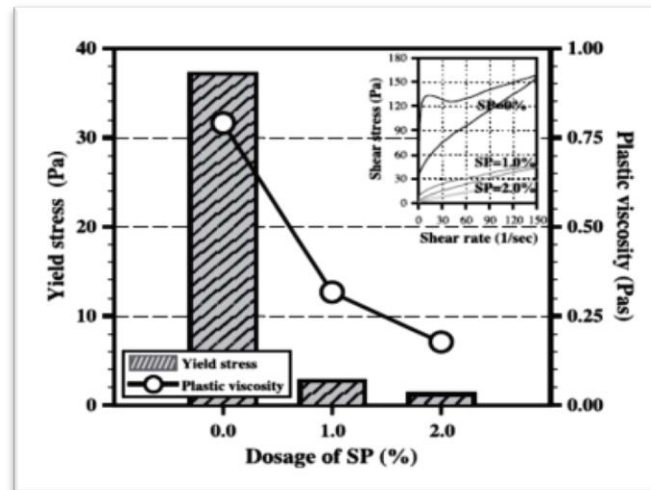


Figure II. 11: Effet du dosage en SP sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment portland (Park et al, 2005)

➤ Rôle des ajouts cimentaires :

Les ajouts cimentaires (AC) sont devenus un ingrédient essentiel et indispensable dans l'industrie du béton. Ce sont généralement des coproduits et des sous-produits de procédés industriels. Ils sont incorporés directement dans les centrales à béton lors de la confection des mélanges de béton ou broyés et mélangés conjointement avec le clinker pour produire des liants composés à matrice binaire, ternaire et même quaternaire. L'emploi des ajouts cimentaires contribue à améliorer la durabilité des bétons par leur action pouzzolanique et/ou hydraulique, à limiter l'utilisation des ressources naturelles pour la production de ciment et à réduire la teneur des gaz à effet de serre. Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés dans l'industrie du ciment et du béton, on retrouve : les cendres volantes, les laitiers de hauts de fourneau et la fumée de silice.

II.1.8.2:À l'échelle du BAP :

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. Le comportement rhéologique d'un matériau (figure II.12) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement (τ_0).

Le fluide est considéré comme binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}^b$$

avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) et $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation (s^{-1}).

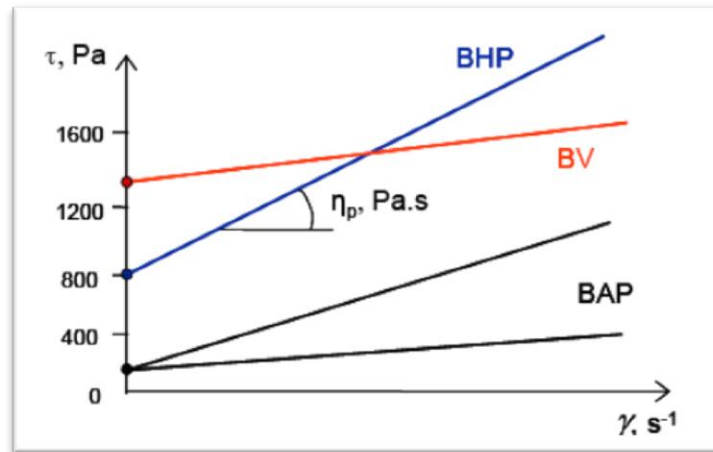


Figure II. 12: Exemples de comportement rhéologiques pour différents types de béton (Assié S, 2004).

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, certains auteurs ont montrés que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$$

Où **a** et **b** sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Nous allons voir dans les paragraphes suivants le rôle de la teneur en eau, des ajouts cimentaires et des granulats sur les performances des BAP à l'état frais et à l'état durci. Le rôle des adjuvants chimique a été vu précédemment à l'échelle de la pâte.

➤ Rôle des ajouts cimentaires :

Les ajouts cimentaires améliorent les propriétés d'écoulement des BAP, aident à maintenir une bonne stabilité, à éviter le ressuage et à diminuer le dégagement de chaleur (Khayat, 1999).

L'incorporation de la fumée de silice améliore la stabilité et la résistance au ressuage des BAP, augmente les résistances aux jeunes âges ainsi que la durabilité. Les effets bénéfiques

de la fumée de silice sont dus à la forme sphérique de ses particules, à sa grande finesse et à sa forte réactivité, elle contribue à la densification de la matrice cimentaire et à l'augmentation de la compacité granulaire. En outre, la fumée de silice a un rôle de filler, elle comble les vides inters granulaires entre les particules de plus grandes dimensions et peut constituer un site de nucléation pour les C-S-H impliquant un raffinement des pores du béton.

➤ **Rôle des granulats :**

Les granulats sont des matériaux inertes composés de sable, de graviers ou de cailloux. Ils constituent le squelette granulaire du béton et ont diverses origines : naturelle, artificielle ou recyclée. Il est bien connu que l'écoulement du béton est régi en grande partie par le comportement rhéologique de la pâte qui le constitue, cependant, les caractéristiques des granulats et leur proportion peuvent constituer des critères de performance des BAP (Hwanget al, 2006; Okamura et Ouchi, 2003). Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à l'effet de la teneur en granulats et du diamètre maximal des granulats.

➤ **Effet de la teneur en granulats :**

Dans les BAP, la teneur en gros granulats varie entre 28% à 35% du volume total du béton autoplaçant (Domone, 2006; Ghezal, 1999. Mecheymach2005) rapporte que d'après l'étude de (Yuguri et coll1989) plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue, donc le volume des gros granulats dans le béton est un facteur important pour le contrôle de la maniabilité. D'après (Bethmont, 2005, Edamatsu et al, 1999) mentionnent que la quantité de sable contenue dans le mortier a une influence sur la capacité de remplissage et doit donc être contrôlée. L'AFGC recommande l'utilisation d'un rapport G/S de l'ordre de 1 afin d'assurer une bonne déformabilité du BAP.

➤ **Effet du diamètre maximal du granulats (MSA):**

Afin d'augmenter la déformabilité du béton autoplaçant et limiter le risque de blocage dans les régions étroites d'un coffrage, il est important de réduire le diamètre maximal des gros granulats (Khayat, 1999). (Assad et Khayat, 2006) ont étudié l'effet des caractéristiques des gros granulats sur la pression latérale du BAP. Ils ont comparé les propriétés à l'état frais des BAP avec 10, 14 et 20 mm de MSA. Leurs résultats montrent que l'augmentation du MSA de 10 à 20 mm entraîne une diminution des performances des BAP lors des essais au J-Ring et L-Box. Cela peut être dû à l'augmentation de la friction interne et des collisions entre les granulats, ce qui empêche un bon écoulement (Assaad et Khayat, 2006). Néanmoins, il est possible de choisir un plus grand diamètre de granulats dans le cas où la section à couler est suffisamment large et que le confinement et la densité du ferrailage sont faibles.

Partie 02 : méthodes des plans d'expériences

II.2.1 : Introduction :

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles (Goupy, 2001)

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le nombre de mélanges à préparer, qui répondent correctement à nos attentes, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement.

II.2.2 : Définition :

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats.

II.2.3 : Le principe :

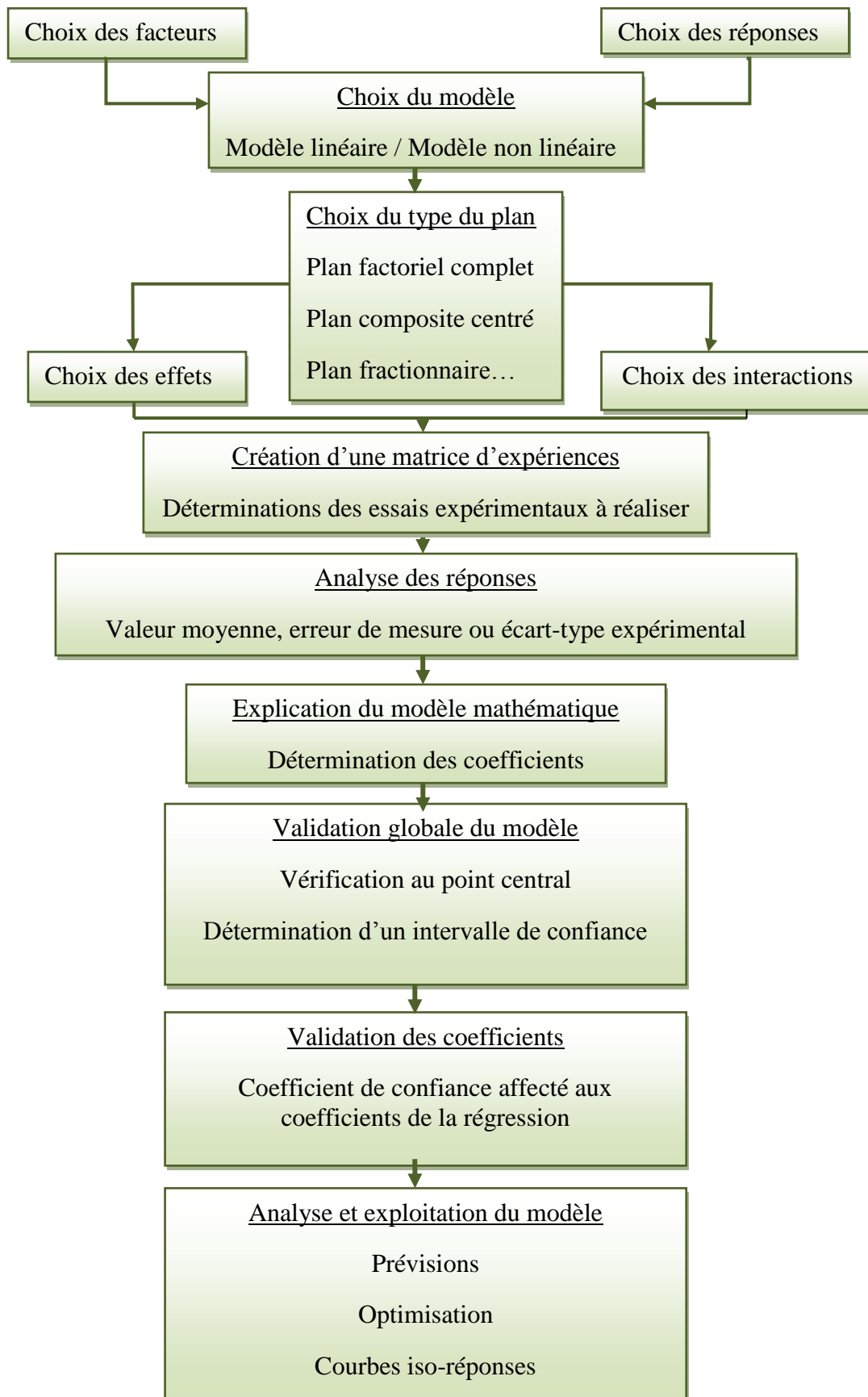
Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées.

II.2.4 : Démarche méthodologique :

Le schéma ci-dessous présente un organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. BoukliHacene, 2010]



II.2.5: Analyse des résultats :

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparés les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

II.2.6 : Terminologie :

II.2.6.1 : Les différents types de facteurs :

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens. (Goupy 2013)

➤ Facteurs continus :

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

➤ Facteurs discrets :

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qui a une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

➤ Facteurs ordonnables :

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

➤ Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II.2.6.2 : Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.9). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut. (Goupy 2013)

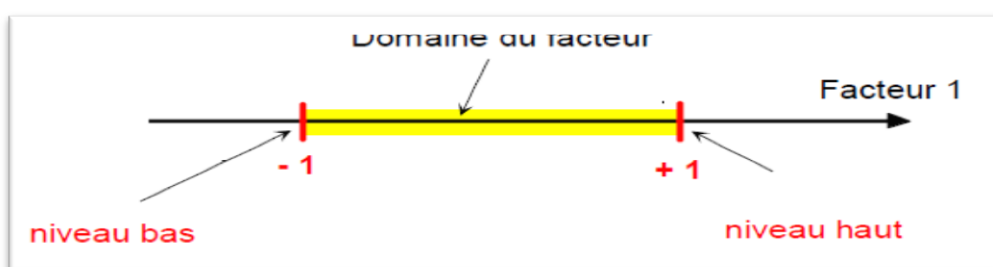


Figure II. 13: le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur

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

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



Figure II. 14: l'espace expérimental d'un facteur

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.15). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

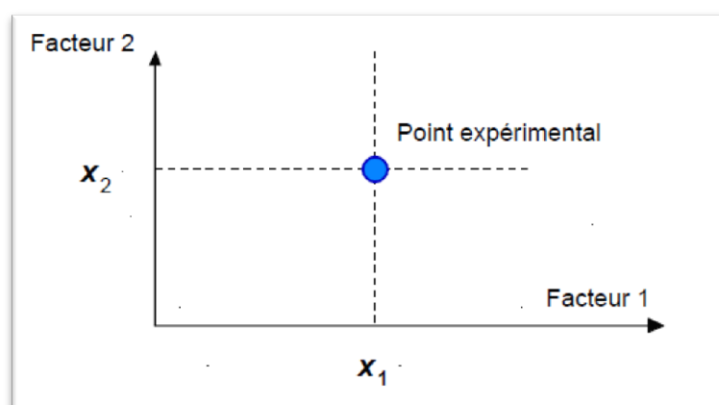


Figure II. 15: Les points expérimentaux dans un espace.

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.16). Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

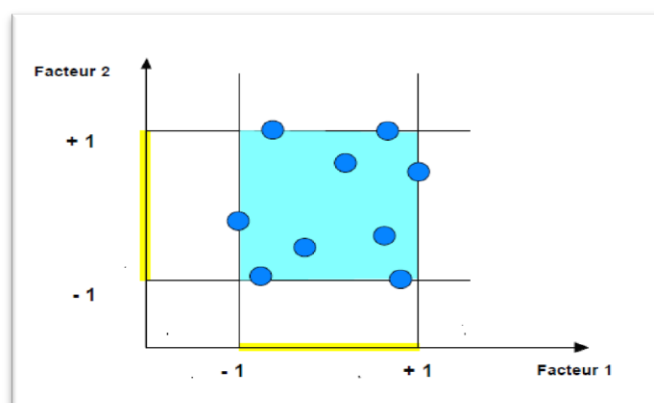


Figure II. 16: Les points expérimentaux dans un domaine d'étude.

II.2.7 : Intérêts des plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche-développement.

Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- Industries des matériaux.
- Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- Industries mécaniques et automobiles
- Industries métallurgiques

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées.
- Une précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié (Frédéric.G, 1995).

II.2.8 : Méthodologie des plans d'expériences

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

II.2.8.1 : La recherche des facteurs influents

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié; la question est de savoir quels sont les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse :

- Lesquels a une influence significative ?
- Que vaut cette influence ?
- Et y a t il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe à la seconde étape.

II.2.8.2 : La modélisation

Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe.... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme

des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets (Frédéric.G, 1995).

II.2.8.3 : L'optimisation

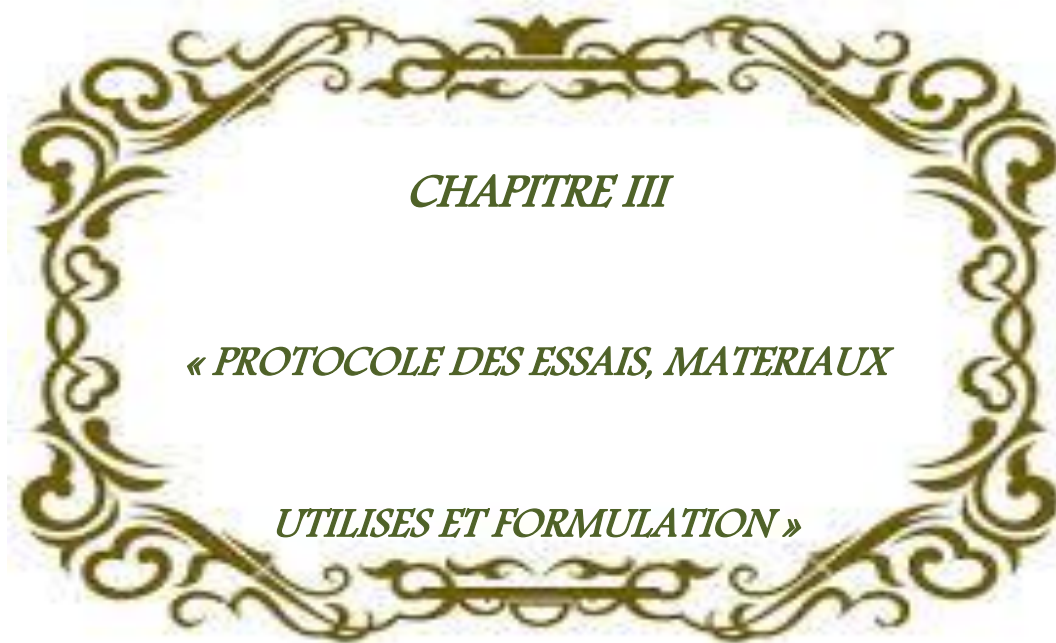
Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié (Pillet.M, 1992).

II.2.9 : Présentation de logiciel « Design-Expert »

Le logiciel utilisé pour la réalisation de cette étude est le logiciel Design-Expert 6.0.8 version anglaise.

Le logiciel Design-Expert permet la conception de stratégies expérimentales optimales, ainsi que l'élaboration des plans d'expériences et l'analyse de leurs résultats. Il s'adapte à tous types de problèmes afin de répondre précisément aux objectifs tout en tenant compte des contraintes expérimentales.

Pour le traitement des plans d'expériences, le logiciel Design-Expert met à notre disposition des outils d'analyse et des indicateurs statistiques spécifiques de l'objectif poursuivi.



III.1 : Introduction :

Les caractéristiques des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application. Ce n'est qu'en évaluant ou en mesurant exactement les qualités et les propriétés les plus importantes, que nous pourrions confectionner des bétons qui nous permettent de construire des édifices et des ouvrages solides, durables et de haute efficacité économique et technique.

Les essais de caractérisation des matériaux utilisés ont été réalisés au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire physique de la cimenterie d'Ain El-kbira.
- Laboratoire de département de Génie Civil de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi ; Bordj Bou Arreridj, selon les normes européennes et normes françaises.

Partie 1 : Matériaux utilisés et protocoles d'essais:

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux.

Les essais de caractérisation de différents matériaux utilisés ont été élaborés au sein des deux laboratoires ; laboratoire de Génie Civil à l'université de Bordj Bou Arreridj et le laboratoire de la cimenterie d'Ain El-kbira.

III.1.1 Sable :

III.1.1.1 Caractéristique du sable :

Le sable utilisé est de provenance du gisement d'Oued Souf, qui se situe à 620 Km au sud-est d'Alger, c'est un sable naturel (sable de dune), il est constitué principalement de petites particules de silice, propre dont les grains sont généralement de forme isométrique et arrondie de dimension variant entre 0,08 et 3 mm.

III.1.1.2:Composition granulométrique des sables préparés:

Le sable a été préparé au niveau de laboratoire de Génie Civil de l'université de Bordj Bou Arreridj. Trois types de sables sont préparés pour la formulation des BAP étudiés, un sable témoin composé entièrement du quartz, un deuxième sable (type 01) préparé par substitution de 5% des fractions fines de quartz (0,16 – 0,315) par l'ajout pouzzolane et un troisième sable (type 02) préparé par substitution de 5% des fractions fines de quartz (0,16 – 0,315) par l'ajout laitier, selon (le tableau III.1)

Tableau III. 1: la composition granulométrique du sable préparé

Fraction	Pourcentage
2,5 – 3,15	5 %
1,25 – 2,5	20 %
0,63 – 1,25	20 %
0,315 – 0,63	30 %
0,16 – 0,315	15 %
0,08 – 0,16	10 %
	100 %

**Figure III. 1:** Les différentes fractions du sable préparé.

Les granulats sont classés en fonction de leur granulométrie déterminée par l'analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans une série normalisée. Les fractions du sable et d'ajouts ont été mélangées selon le tableau suivant :

Tableau III. 2: Les fractions de chaque type de sable utilisé.

Fraction	Pourcentage	Sable témoin (ST)	Sable (SPZ)	Sable (SLHF)
0,08 – 0,16	10 %	Sable quartzeux	Pouzzolane	Laitier de haut fourneau
0,16 – 0,315	15 %	Sable quartzeux	5 % pouzzolane	5 % laitier de haut fourneau
			Sable quartzeux	Sable quartzeux
0,315 – 0,63	30 %	Sable quartzeux	Sable quartzeux	Sable quartzeux
0,63 – 1,25	20 %	Sable quartzeux	Sable quartzeux	Sable quartzeux
1,25 – 2,5	20 %	Sable quartzeux	Sable quartzeux	Sable quartzeux
2,5 – 3,15	5 %	Sable quartzeux	Sable quartzeux	Sable quartzeux

III.1.1.3 Protocole d'essai de sable :

III.1.1.3.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NF EN 933-1]

➤ But d'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai :

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne des tamis.

➤ Matériels utilisés :

Tableau III. 3: Tamis utilisés pour le tamisage du sable

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/3	[3,15 – 2,5 – 1,25 – 0,63 – 0,315 – 0,16 – 0,08]

➤ Préparation de l'échantillon :

L'échantillon de sable est préparé selon la norme NF EN 933-1.

La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à 0,2D, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

➤ Mode opératoire :

L'opération du tamisage du sable se fait au moyen d'une tamiseuse où on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil, en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 03 fois durant 3 min à chaque fois.

Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représentés dans la figure III.3:

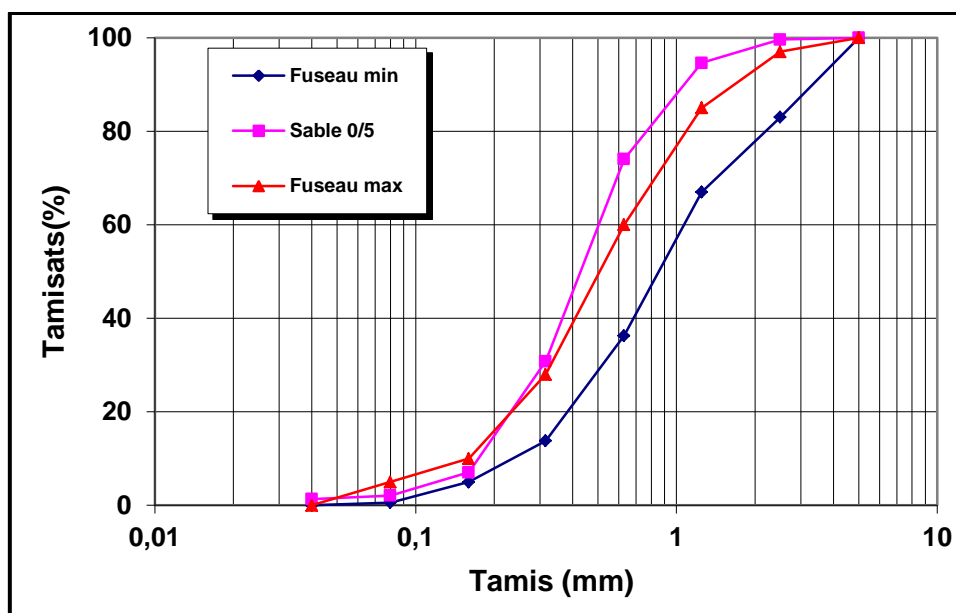


Figure III. 2: Analyse granulométrique du sable d'Oued Souf.

III.1.1.3.2 Module de finesse :

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible plus le sable est riche en éléments fins, il est égal à 1/100 de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : [3,15 – 2,5 – 1,25 – 0,63 – 0,315 – 0,16 – 0,08].

Tableau III. 4: Module de finesse du sable.

Qualité du sable	Module de la finesse
Gros	>2,5
Moyen	2 à 2,5
Fin	1,5 à 2
Très fin	1 à 1,5

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd son ouvrabilité.

$$MF = \sum Ri/100$$

$$MF = (1/100)\sum(\text{refus cumulés en \% des tamis [0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 3,15]})$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que le module de finesse du sable testé est égal à :

$$MF = 1,94 \rightarrow 1,5 < MF < 2 \rightarrow \text{C'est un sable fin.}$$

III.1.1.3.3 Equivalent de sable : [NF EN 933-8]

➤ But de l'essai :

Cet essai consiste à déterminer la quantité d'éléments fins (argile, limon, impuretés...) contenus dans le sable par rapport à la quantité d'élément sableux.

➤ Mode opératoire :

- Remplir l'éprouvette d'une solution lavante jusqu'au premier repère.
- A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favorise le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontales en 30 secondes à la main à l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.

A. Equivalent de sable visuel (E.S.V) :

- Après 20 minutes de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E.S.V = \frac{h_2}{h_1} 100\%$$

Avec :

h_1 : Hauteur du sable le plus flocculat.

h_2 : Hauteur du sable.

B. Equivalent de sable par piston (E.S.P) :

Introduire le piston dans l'éprouvette et le laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E.S.P = \frac{h'_2}{h'_1} 100\%$$

Avec :

h'_1 : Hauteur du sable le plus flocculat.

h'_2 : Hauteur du sable.

Tableau III. 5: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E.S.V et E.S.P

ESV (visuel)	ESP (par piston)	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
ES ≥ 85%	ES ≥ 80%	Sable très propre ; l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Après la comparaison aux résultats proposés par G-DREUX :

$$75 \leq E.S.V = 83.89 \leq 85$$

$$70 \leq E.S.P = 79.97 \leq 80$$

Donc : le sable d'Oued Souf est propre.

III.1.1.3.4 Masse volumique : [NF EN 1097-6]

A. Masse volumique apparente :

➤ Principe de l'essai :

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité des granulats correspondants.

➤ Matériels utilisés :

- Une balance avec une précision de 0,01 g.
- Un récipient avec un volume de 1 litre.
- Une règle à araser.

➤ Mode opératoire :

- Peser le récipient vide et le tarer.
- Prendre le sable dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à une hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusqu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 6: Masse volumique apparente du sable d'Oued Souf.

N° d'essai	Masse (g)	Volume (l)	ρ_{app}	ρ_{appmoy} (g/cm ³)
1	1617	1	1,617	1,617
2	1619		1,619	
3	1615		1,615	

A. Masse volumique absolue :

La mesure s'effectue par la méthode de l'éprouvette graduée selon les étapes suivantes :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau V_1 ; ($V_1 = 400$ ml).
- Peser un échantillon sec M de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette.
- Lire le niveau V_2 .

Alors, la masse volumique absolue est :

$$\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1)$$

On refait l'opération trois fois et on trouve les résultats dans le tableau suivant :

Tableau III. 7: Masse volumique absolue du sable d'Oued Souf.

N° d'essais	Masse (g)	Volume ₁ (l)	Volume ₂ (l)	Abs (g/cm ³)	Abs moyenne (g/cm ³)
1	300	400	515	2.608	2.543
2			520	2.50	
3			519	2.521	

III.1.1.3.5 Porosité :

C'est une caractéristique très importante qu'il faut la prendre en considération car elle influe sur certaines propriétés telles que la résistance mécanique.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P (\%) = [1 - (\rho_s/\gamma)] 100\%$$

III.1.1.3.6 Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité est donnée par la relation suivante :

$$C = 1 - P$$

III.1.1.3.7 Indice des vides :

Le rapport du volume des vides sur le volume des solides :

$$e = P/C$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 8: La porosité, la compacité et l'indice des vides pour le sable d'Oued Souf.

Porosité (%)	Compacité (%)	Indice de vide (%)
36,41	63,59	57,25

III.1.2 Gravier :

III.1.2.1 Caractéristiques du gravier :

Une étude de composition du béton est effectuée sur deux classes granulaires qui sont :

- La fraction 3/8
- La fraction 8/15

Le gravier 3/8 provient de la carrière de Sétif « Salhi – El Mzara – Route HammanSokhna », et le gravier 8/15 est de la carrière d'El-Euch « Mechri ».

III.1.2.2 Méthode de préparation du gravier :

Le gravier a été tamisé, lavé et séché à l'étuve (105°). Les fractions du gravier ont été mélangées selon le tableau (III.9) :

Tableau III. 9: Composition des fractions du gravier en %.

Fraction	Pourcentage (%)
3/8	40
8/15	60

III.1.2.3 Protocole d'essai de gravier :

III.1.2.3.1 Analyse granulométrique par tamisage : [NF EN 933-5]

➤ But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur, et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. Elles s'appliquent à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers.

➤ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau.

➤ Matériels utilisés :

Une colonne de tamis propres correspondants à chaque fraction.

Tableau III. 10: Les tamis utilisés pour le tamisage du gravier (3/8 - 8/15).

Fraction	Tamis utilisés (mm)
3/8	[8 – 6,3 – 5 – 4 – 3,15 – 2,5 et le fond]
8/15	[16 – 12,5 – 10 – 8 – 6,3 – 5 et le fond]

➤ Préparation de l'échantillon :

L'échantillon du gravier est préparé selon la norme NF EN 933-5.

La masse M de l'échantillon doit être supérieure à 0,2D, avec M exprimée en kilogramme et D est la plus grande dimension spécifiée en millimètre.

➤ Mode opératoire :

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier, la seule différence est la durée de l'essai qui a été de 5 minutes dans le cas des graviers.

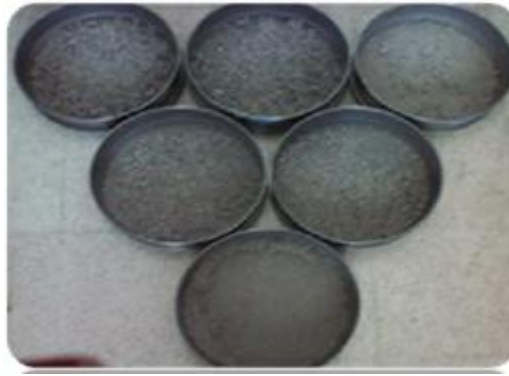


Figure III. 3: Les fractions du gravier après tamisât.

Les résultats de l'analyse granulométrique des graviers sont classés dans les graphes suivants :

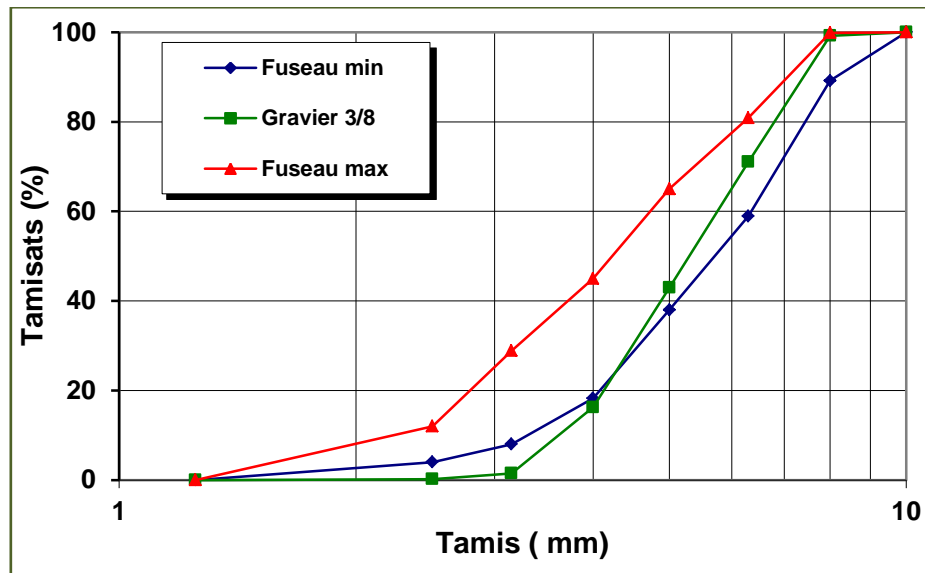


Figure III. 4: L'analyse granulométrique du gravier (3/8)

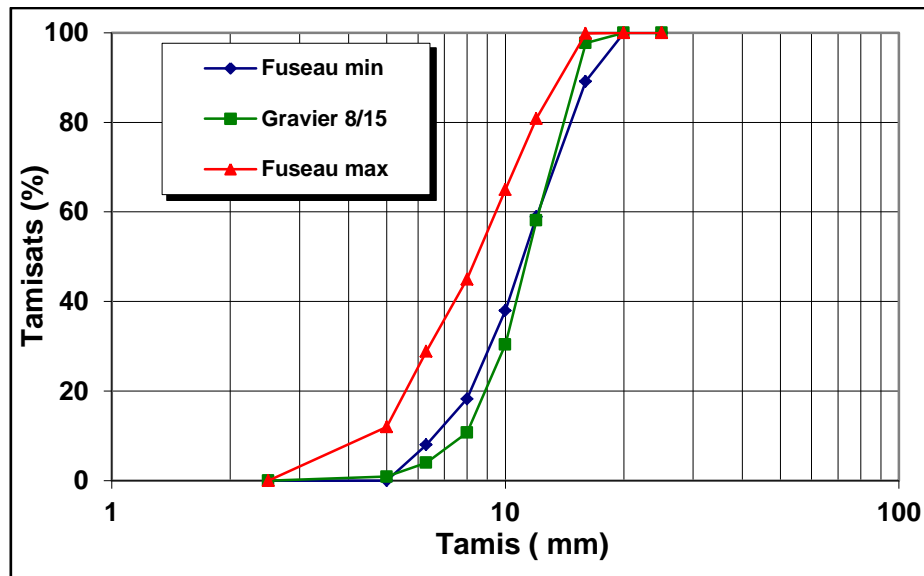


Figure III. 5: L'analyse granulométrique du gravier (8/15)

III.1.2.3.2 La densité :

En sens physique ; c'est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température. Elle est exprimée sans unité.

III.1.2.3.3 La masse volumique : [NF EN 1097-6]

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps. Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité : une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4°C, c'est-à-dire une grandeur sans unité.

Comme il existe le volume apparent et le volume absolu, on distinguera :

A. La masse volumique apparente :

C'est le rapport entre la masse d'un corps est l'unité de volume apparent (y compris les vides). Elle est exprimée en (g/cm^3 , Kg/m^3 , t/m^3).

➤ Principe de l'essai :

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité des granulats correspondante.

➤ Matériels utilisés :

- Une balance avec une précision de 0,01g.

- Un récipient avec un volume de 5 litres.
- Une règle à araser.
- **Mode opératoire :**
- Peser le récipient vide et le tarer.
- Prendre le gravier dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à une hauteur de 10 cm au-dessous du récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusqu'il soit rempli et débord au tour.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau III. 11: La masse volumique apparente du gravier (3/8) et (8/15).

Gravier	Masse 2 (g)	Volume (l)	$\rho_{app}(g/cm^3)$	$\rho_{appmoy} (g/cm^3)$
(3/8)	2945	1	1,5015	1,500
	2947		1,5035	
	2939		1,4955	
(8/15)	6783,5	5	1,377	1,364
	6772		1,349	
	6777		1,364	

B. La masse volumique absolue :

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides qui peuvent exister dans ou entre les grains. Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³, t/m³).

➤ **Principe de l'essai :**

Consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée, car cette méthode est très simple et très rapide.

➤ **Matériels utilisés :**

- Une éprouvette graduée en verre.

➤ **Mode opératoire :**

- Remplir l'éprouvette par un volume d'eau ($V_1 = 400$ ml).
- Peser une masse ($M = 300$ g) du gravier.
- Introduire cette masse dans l'éprouvette et assurer l'élimination des bulles d'air).
- Noter le nouveau volume V_2 .
- Cette opération est répétée 3 fois.

La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1)$$

Les résultats sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 12: La masse volumique absolue du gravier (3/8) et (8/15).

Gravier	Masse (g)	Volume ₁ (l)	Volume ₂ (l)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{absmoy} (g/cm ³)
(3/8)	300	400	520	2,50	2,64
			510	2,73	
			511	2,70	
(8/15)	300	400	378	2,564	2,564
			379	2,532	
			377	2,597	

Tableau III. 13: Porosité, compacité et indice des vides du gravier (3/8) et (8/15).

Gravier	Porosité (%)	Compacité (%)	Indice des vides (%)
(3/8)	43	57	75,44
(8/15)	46,8	53,2	87,97

III.1.2.3.7 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles): [EN 1097-2]

➤ But de l'essai :

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats.

➤ Principe de l'essai :

- Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, en évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm
- Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50).
- On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'aciers dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après

➤ Mode opératoire:

- Après, introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr/min à 33 tr/min.
- Après l'achèvement de l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste aux pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus une fois sécher. Soit P le résultat de la pesée avec :

Le coefficient de Los Angeles « LA » est donné par la relation suivante :

$$P = 5000 - \text{refus}$$

P : est le passant à 1.6mm.

$$LA = 100 (P/5000)$$

Tableau III. 14: Estimation de la dureté des granulats en fonction du coefficient L_A .

Coefficient L_A (%)	Estimation de la dureté des granulats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Le résultat obtenu est inscrit ci-dessous :

$$L_A (\%) = 21,64$$

Donc la valeur de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dure et reconnue apte pour la confection du béton.

III.1.2.3.8 Degré d'absorption d'eau : [EN 1097-6]

Le coefficient A mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant, on en tient compte dans la formulation, Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A (\%) = [(M_h - M_s)/M_s].100$$

M_h : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_s : La masse du matériau sec en (g).

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III. 15: Degré d'absorption d'eau des agrégats (8/15).

Fraction	M_h (g)	M_s (g)	A (%)
(8/15)	1009	1000	0,9

III.1.3 Les ajouts minéraux :

III.1.3.1 Caractérisation des ajouts :

Les propriétés des ajouts ont été déterminées au niveau du laboratoire de la cimenterie d'Ain El-Kbira.

Les ajouts utilisés dans notre programme expérimental sont les suivants :

➤ **Pouzzolane :**

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine volcanique essentiellement composées de Silice, d'Alumine et d'Oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elles peuvent être d'origine : verre volcanique, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire : terre à diatomée, diatomites.



Figure III. 6: la pouzzolane broyée.

Au cours de cette étude, on a utilisé la pouzzolane naturelle issue du gisement de Beni Saf dont les caractéristiques chimiques et physiques sont illustrées dans les tableaux suivants:

Tableau III. 16: Composition chimique de la pouzzolane.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	PAF
38,57	16,77	15,39	11,77	3,09	0,34	1,638	0,012	12,419

Tableau III. 17: Propriétés physiques de la pouzzolane.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Fraction	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
2,75	0,08 – 0,16	4051
	0,16 – 0,315	2900

➤ **Laitier de haut fourneau :**

Le laitier qui est choisi pour le programme expérimental est un laitier de production local « El-Hadjar » qui a été broyé aux finesses de 4557 cm²/g et 2907 cm²/g.



Figure III. 7: Laitier broyé

Tableau III. 18: Analyse chimique du laitier de haut fourneau.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cl	PAF
29,04	10,06	31,73	0,24	3,70	2,28	0,48	0,022	22,445

Tableau III. 19: Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Fraction	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
2,807	0,08 – 0,16	4557
	0,16 – 0,315	2907

➤ **Les fillers :**

- **Poudre de verre :**

Au cours de cette étude, nous avons utilisé une poudre de verre provenant du broyage des déchets de verre. Le broyage de la poudre de verre a été effectué au niveau de laboratoire d'Ain El-Kbira.



Figure III. 8: la poudre de verre.

Les caractéristiques chimiques et physiques sont présentées dans les tableaux (III.20) et (III.21).

Tableau III. 20: Analyse chimique du verre.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
70,26	0,85	8,92	2,03	1,71	0,18	0,85	5,00

Tableau III. 21: Propriétés physiques du verre.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
2,54	5549

Fumée de silice :

La Fumée de silice, utilisée dans le cadre de cette étude provient du groupe GRANITEX de Oued Semmar. Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées dans les tableaux (III.22) et (III.23) :

Tableau III. 22: Composition chimiques de la fumée de silice.

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	PAF
%	88,607	0,964	0	0,995	0,104	1,263	0,398	0	0,04	8

Tableau III. 23: Caractéristiques physique de la fumée de silice.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,24
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	30000

III.1.3.2 Préparation des ajouts :

Les ajouts sont obtenus du concassage et le broyage, qui ont récupérés auprès de la cimenterie d'Ain El-kbira (pouzzolane), de la cimenterie de Lafarge à Hammam El-dhalaa (laitier de haut de fourneau) et les déchets de verre des fenêtres, des miroirs (poudre de verre).

III.1.4 Ciment :

III.1.4.1 Caractéristiques de ciment :

Dans notre étude, on a utilisé deux types de ciment ; le CPJ/CEMII/A/42,5 fabriqué à Ain El-Kbira et le CPJ/CEMII/B/42,5 fabriqué au niveau de la cimenterie de Lafarge à Hammam El-Dhalaa.



Figure III. 9: Ciments utilisés CEMII/42.5 et MATIN Lafarge.

III.1.5 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton doit être pure que possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc....

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable « eau de robinet » fournie au laboratoire de Génie Civil à l'université de Bordj Bou Arreridj.

III.1.6 Adjuvant :

L'adjuvant utilisé dans notre étude : **Super plastifiant – haut réducteur d'eau (MEDAFLOW 30)** conforme à la norme **EN 934-2**.

➤ Description :

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de poly carboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Il permet d'obtenir des bétons de très haute qualité.



Figure III. 10: Le super plastifiant MEDAFLOW 30.

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

Tableau III. 24: Les caractéristiques du superplastifiant (MEDAFLOW 30).

Aspect	Couleur	pH	Densité	Teneur en chlore (g/l)	Extrait sec (%)
Liquide	Brun clair	6 – 6,5	1,078 ± 0,01	< 0,1	30

➤ **Propriétés et domaines d'application :**

Tableau III. 25: Les propriétés du superplastifiant sur les bétons.

Sur béton frais	Sur béton durci	Domaine d'application
1- L'obtention d'un E/C très faible. 2- L'amélioration considérable de la fluidité. 3- Une très bonne maniabilité. 4- Un long maintien de l'ouvrabilité. 5- Eviter la ségrégation. 6- faciliter la mise en œuvre du béton.	1- Augmenter les résistantes mécaniques à jeune âge et à long terme. 2- Diminuer la porosité. 3- Augmenter la durabilité. 4- diminuer le retrait et le risque de fissuration.	1- Bétons à haute performances. 2- Bétons auto plaçant. 3- Bétons Pompés. 4- Bétons précontraints. 5- Bétons architecturaux.

Partie 02 : Formulation du BAP et protocoles d'essais

Une approche expérimentale à été utilisée pour la formulation des BAP pour la réalisation de la première tranche de cette étude portant sur le sable préparé. Elle s'appuie sur des critères recommandés par « la méthode française (Laboratoire Centrale de Ponts et Chaussées connue sous l'abréviation (LCPC)) », proposée par De Larrad et al.

Une deuxième approche pour la réalisation de la seconde tranche de cette étude visant l'établissement d'une matrice de formulation basé sur la méthode des plans d'expérience.

III.2.1 Application numérique de la formulation du BAP selon LCPC:

A. Les données de base :

Tableau III. 26: Données de base pour le BAP à base d'un sable préparé.

Dosage en ciment (Kg/m ³)	Pourcentage du filler (poudre de verre)	G/S	E/L	Pourcentage du super plastifiant	Pourcentage d'air
250					
300	20%	1	0,38	1,2%	25%
350					

Tableau III. 27: Données de base pour le plan d'expérience.

N°	G/S	Pourcentage du filler (Fumée de silice)	Ciment (Kg/m ³)	Pourcentage du super plastifiant	Pourcentage d'air
1	1,15	5	350		
2	1	10	400		
3	0,85	5	350		
4	0,85	5	400		
5	1	15	400		
6	1	5	350		
7	1,15	15	400		
8	1	10	400		
9	1	10	350		
10	0,85	10	350		
11	1	10	400		
12	1	10	350	1,2%	50%
13	1,15	10	400		
14	0,85	15	400		
15	1,15	15	350		
16	1	10	400		
17	0,85	15	350		
18	1	10	350		
19	1	5	400		
20	1	10	350		
21	0,85	10	400		
22	1	15	350		
23	1,15	5	400		
24	1	10	400		
25	1	10	350		
26	1,15	10	350		

B. Exemple de détermination de la masse de chaque constituant:

On a :

- $G/S = 1$
- $E/(C+F) = 0,38$
- Le dosage en super plastifiant est déterminé selon l'essai du mini cône : 1,2% de la masse du liant (ciment + filler).
- Le pourcentage d'air : 25% du volume totale (1000L).
- Le dosage en filler (poudre de verre) est 20% de la masse du ciment.

➤ **Dosage de liant** : $C = 250 \text{ kg/m}^3$.

➤ **Dosage de filler** (poudre de verre):

Pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage les BAP des fillers ont été introduits dans la formulation. Qui est représenté 20% du poids du ciment.

Donc : $PV = 50 \text{ kg/m}^3$.

➤ **dosage en eau:**

Pour déterminer le dosage en eau et le dosage minimal en super plastifiant, on s'est basé sur les essais effectués sur la pâte issue du BAP dosé comme il suit :

$C = 250 \text{ kg/m}^3$ et $F = 50 \text{ kg/m}^3$ et avec $E/(C+F) = 0,38$

Dosage en eau est : $E = 0,38 \times (250 + 50)$ $E = 11,215 \text{ m}^3$ →

➤ **Dosage en super plastifiant:**

Le dosage en super plastifiant est 1,2% de la masse ciment et filler.

$SP = 0,012 \times (250 + 50)$ → $SP = 3,6 \text{ kg/m}^3$.

L'extrait sec du super plastifiant (poly carboxylate) est de 30% et l'extrait liquide est de 70%, donc le volume du super plastifiant est :

$V_{\text{liq}} = 3,6 / (30\% \times 1,07) = 11,215 \text{ l/m}^3$

$V_{\text{eau}} = (11,215 \times 1,07 \times 70) / 100 = 8,4 \text{ l/m}^3$

D'où : la quantité d'eau utilisée pour 1 m^3 est de $105,6 \text{ l/m}^3$.

Donc : Le volume de la pâte est : $214,86 \text{ l/m}^3$.

Le volume de la pâte et le volume d'air : $235,86 \text{ l/m}^3$.

➤ **Dosage en granulat:**

Le dosage des granulats est basé sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire (graviers + sable).

On a choisi $G/S = 1$

Volume de granulats égal à : **760,14 l/m³**

Donc: $G+S=760,14$  $G=760,14 - S$

Le dosage en sable et gravier est tel que:

$S= 760,14 / 1$  $G = S= 380,07\text{l/m}^3$.

Les masses de constituants pour 1 m³ du BAP :

- ✓ Les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires.
- ✓ Le cahier des charges d'un BAP comporte plus clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser en plus de l'essai au cône, l'essai de la boîte en L et stabilisation au tamis.
- ✓ Les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

Les tableaux suivants présentent la composition de notre BAP :

Tableau III. 28: La composition des BAP à base du sable préparé.

Constituants	Ciment (Kg)	Poudre de verre (Kg)	Super plastifiant (l)	Eau (l)	Sable (Kg)	Gravier (3/8) (Kg)	Gravier (8/15) (Kg)
Poids sec en Kg/m³	250	50	11,215	105,6	965,378	401,354	583,79
	300	60	13,46	126,72	910,81	378,67	550,79
	350	70	15,70	147,84	856,23	355,98	517,78

III.2.2 : Formulation du BAP par plan d'expérience :

Tableau III. 29: La construction du plan d'expérience.

Facteurs	Nom	Unités	Type	niveau inférieure	niveau supérieur
A	Rapport G/S	/	Numérique	0.85	1.15
B	Fumée de silice	%	Numérique	5	15
C	Dosage en ciment	kg/m ³	Catégorial	400	350

Tableau III. 30: Les mélanges préparés pour le plan d'expérience.

N°	G/S	F.S	CIM
1	1.15	5	350
2	1	10	400
3	0.85	5	350
4	0.85	5	400
5	1	15	400
6	1	5	350
7	1.15	15	400
8	1	10	400
9	1	10	350
10	0.85	10	350
11	1	10	400
12	1	10	350
13	1.15	10	400
14	0.85	15	400
15	1.15	15	350
16	1	10	400
17	0.85	15	350
18	1	10	350
19	1	5	400
20	1	10	350
21	0.85	10	400
22	1	15	350
23	1.15	5	400
24	1	10	400
25	1	10	350
26	1.15	10	350

Tableau III. 31: La composition des BAP utilisés pour le plan d'expérience.

Constituants	Ciment (Kg)	Fumée de silice (Kg)	Super plastifiant (l)	Eau (l)	Sable (Kg)	Gravier (3/8) (Kg)	Gravier (8/15) (Kg)
Poids sec en Kg/m ³	350	17,5	13,74	136,71	806,15	366,42	560,625
	400	40	16,45	163,68	796,3	331,06	481,54
	350	17,5	13,74	136,71	936,854	331,071	481,56
	400	20	15,701	156,24	884,38	312,52	454,58
	400	60	17,196	171,12	774,57	321,626	467,82
	350	17,5	13,74	136,71	866,597	360,286	524,052
	400	60	17,196	171,12	720,532	344,5	501,08
	400	40	16,45	163,68	796,3	331,06	481,54
	350	35	14,393	143,22	847,583	352,381	512,554
	350	35	14,393	143,22	916,305	323,81	470,99
	400	40	16,45	163,68	796,3	331,06	481,54
	350	35	14,393	143,22	847,583	352,381	512,554
	400	40	16,45	163,68	740,75	354,161	515,144
	400	60	17,196	171,12	837,374	295,916	430,424
	350	52,5	15,046	149,73	770,755	368,507	536,01
	400	40	16,45	163,68	796,3	331,06	481,54
	350	52,5	15,05	149,73	895,731	316,541	460,424
	350	35	14,393	143,22	847,583	352,381	512,554
	400	20	15,7	156,24	818,047	340,101	494,693
	350	35	14,393	143,22	847,583	352,381	512,554
	400	40	16,45	163,68	860,857	304,223	442,51
	350	52,5	15,05	149,73	828,55	344,47	501,05
	400	20	15,7	156,24	760,973	363,830	529,207
	400	20	16,45	163,68	796,3	331,06	481,54
	350	35	14,393	143,22	847,583	352,381	512,554
	350	35	14,393	143,22	788,45	376,965	548,312

III.2.3 Préparation des BAP :

La procédure à suivre pour mettre en place un BAP est décrite suivant la norme [NA EN 12390-2] :

- ✓ Introduire le gravier 8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8.
- ✓ Malaxer pendant 1 min et 30 secs
- ✓ Introduire la quantité d'eau.
- ✓ Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.
- ✓ Mesurer l'étalement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré et visé.

Le temps total de malaxage est de 4 min et 30 secs.

Les différentes éprouvettes de bétons préparées, sont conservées dans une salle humide pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes de béton obtenues sont conservées dans l'eau pendant 28 jours.

III.2.4 Méthodes de caractérisation du BAP à l'état frais :

III.2.4.1 Essais de caractérisation de la pâte :

Il serait vain de vouloir comprendre le comportement du béton sans connaître celui de la pâte qui le compose. Celle-ci est constituée du ciment, d'ajout, de l'eau et d'adjuvant.

Essai au mini cône [NF EN 196-1] :

L'appareil se compose d'un moule tronconique creux de 57mm de hauteur, un diamètre du haut de 19 mm et du bas de 38mm. Le cône est placé au centre d'une plaque en acier, et est rempli de pâte de ciment. Le cône est, ensuite, soulevé et la pâte s'écoule sur la table.

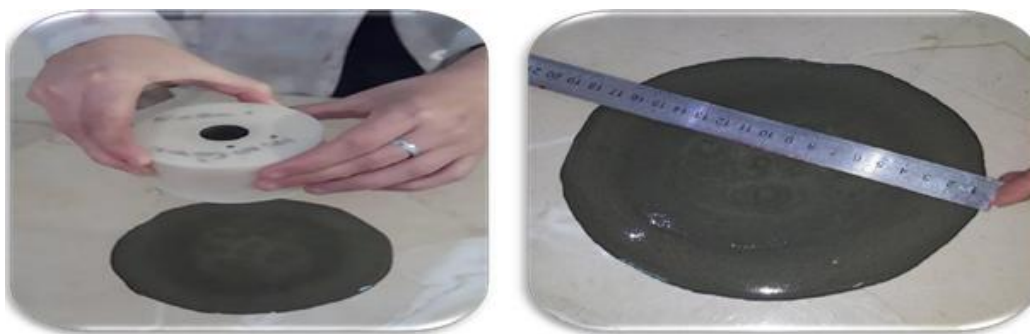


Figure III. 11: Essai de mini cône.

III.2.4.2 Essais de caractérisation des BAP :

Durant notre étude, nous avons réalisé trois familles d'essais pour caractériser les bétons au laboratoire ;

- Essais de caractérisation des bétons à l'état frais.
- Essais de la résistance à la compression des bétons.

III.2.4.2.1 Essais réalisés 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 L-Box et essai de la stabilisation au tamis.

Tableau III. 32: les essais de caractérisation des BAP à l'état frais.

Type d'essai	Valeur mesurée	Indice	Cible
Étalement au cône d'Abrams	Diamètre d'étalement	SF	≥ 660 mm
Boîte en L	Taux de remplissage	PL	$\geq 0,8$
Stabilisation au tamis	Indice de ségrégation	SR	$\leq 15\%$

**Figure III. 12:** Essai d'étalement au cône d'Abrams.**Figure III. 13:** L'essai de la boîte en L (L-BOX).



Figure III. 14: Essai de stabilisation au tamis.

III.2.4.2.2 ICAR rhéomètre :

Mode opératoire :

Le rhéomètre ICAR est composé d'un récipient pour contenir le béton frais, une tête de conducteur qui comprend un moteur électrique et un compteur de couple ; une aube à quatre lames qui est retenue par le mandrin sur conducteur ; un cadre pour attacher l'ensemble pilote / palette au sommet du conteneur, et un ordinateur portable pour faire fonctionner le conducteur, enregistrer le couple pendant le test et calculer les paramètres de la courbe d'écoulement. Le récipient contient une série de tiges verticales autour du périmètre pour éviter le glissement du béton le long de la paroi du récipient pendant le test. La taille du conteneur et la longueur de l'arbre de la palette sont sélectionnées en fonction de la taille maximale nominale du granulat. Le diamètre et la hauteur des aubes sont à la fois de 127 mm.

Deux types de tests sont effectués :

- ✓ Le premier type est un test de croissance du stress dans lequel l'aube est tournée à une vitesse lente constante de 0,025 tour/s. L'augmentation initiale du couple est mesurée en fonction du temps. Le couple maximal mesuré lors de ce test est utilisé pour calculer la contrainte statique.
- ✓ Le deuxième type d'essai est un test de courbe d'écoulement pour déterminer la contrainte élastique dynamique et la viscosité plastique. Le test d'écoulement commence par une période de « panne » dans laquelle la girouette tourne à la vitesse maximale. Ceci est fait pour décomposer toute structure thixotropique qui peut exister et pour fournir un historique de cisaillement cohérent avant de mesurer les paramètres de Bingham. La vitesse de la palette est ensuite diminuée dans un nombre d'étapes spécifié, qui est sélectionné par l'utilisateur mais au moins six étapes sont recommandées au cours de chaque étape, la vitesse de la palette est maintenue constante et la vitesse moyenne et le couple sont enregistrés. La parcelle de couple

par rapport à la vitesse de rotation de l'aube définit la courbe d'écoulement à partir de laquelle les paramètres Bingham sont calculés.

Le logiciel ICAR rhéomètre effectue toutes fonctions nécessaires, actionne le conducteur, enregistre le couple, calcule les résultats des tests et stocke les données. L'ensemble du test est contrôlé à partir d'un seul écran comme indiqué ci-dessous. L'utilisateur définit la géométrie du test et fournit les paramètres de test pour exécuter le test de la courbe d'écoulement. Une simple clique sur le bouton « démarrer » déclenche le test de croissance de la contrainte et le test de la courbe d'écoulement démarre en appuyant sur le deuxième bouton « démarrer »

Les deux tests durent 1 minute.

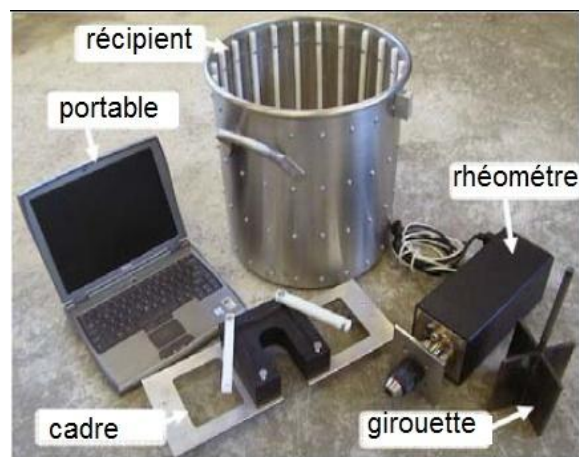


Figure III. 15: ICAR rhéomètre et ces constituants.

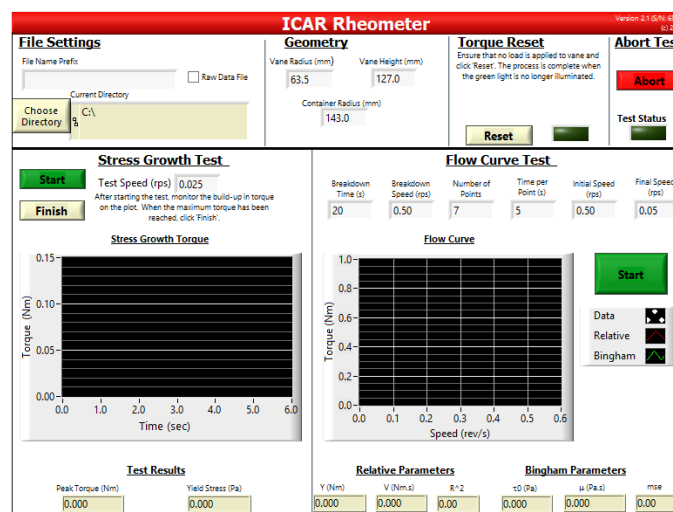


Figure III. 16: Fenêtre de logiciel ICAR Rheometer.

III.2.4.2.3 :Conservation des éprouvettes :

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 48 h après le coulage puis conservées dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (figure III.19).



Figure III. 17: le bac de conservation des éprouvettes.

III.2.4.2.4 : Essais réalisés à l'état durci :

A. Essais destructif :

a- Essai de résistance à la compression : [NF EN 12390-3]

Il est réalisé, conformément à la norme EN 12390-3, sur des éprouvettes cubiques de $(10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3)$ mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression obtenus à 7, 14 et 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 3000 KN.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est exprimée par la formule suivante :

$$R_c = F/S$$

R_c: résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm^2).

Remarque :

La résistance sur cylindre est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes.



Figure III. 18: la presse hydraulique, laboratoire Génie Civil BBA.

b- Essai de la résistance à la flexion : [NF P 18-407]

Cet essai permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages. Les éprouvettes sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = M_f \cdot a/2I$, avec le moment de flexion :

$$M_f = F.L/4$$

Où F : la charge de rupture,

L : la portée,

I : l'inertie de flexion,

a : le côté du prisme.



Figure III. 19: la presse hydraulique de l'essai de la traction par flexion université BBA.

B. Essais non destructif :

a- Essai au scléromètre : [NF EN 12504-2]

Introduction :

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. (Nasri 2016)



Figure III. 20: l'appareil scléromètre.

Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement :

L'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal. (Bouakkaz M, 2012)

Interprétation Des Résultats De Contrôle Du Béton Au Scléromètre :

Méthode de la courbe unique :

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation affectant la corrélation « Indice sclérométrique– Résistance du béton » sont inconnues. On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil fourni par le fabricant. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe peut être évaluée à $\pm 50\%$.

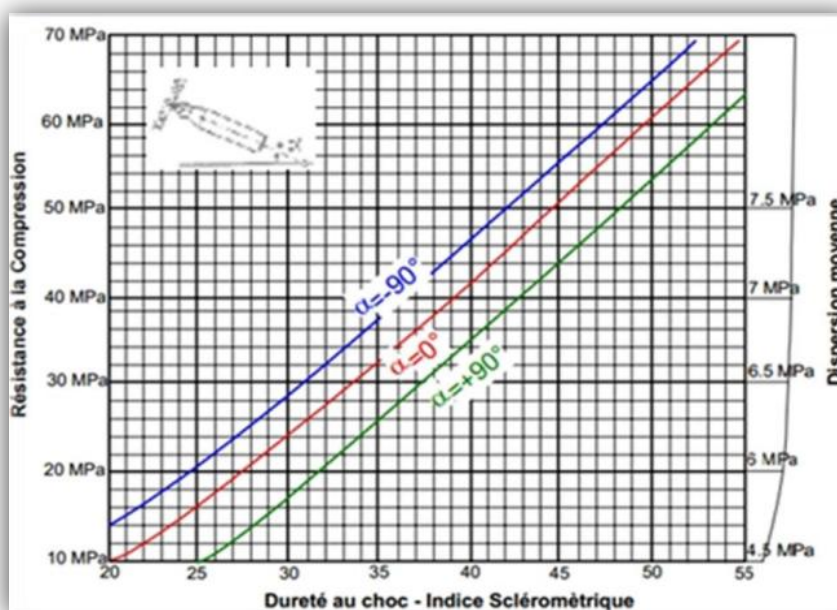


Figure III. 21: La courbe de transformation unique.

La résistance du béton peut aussi être obtenue à partir de la formule suivante :

$$R = I^2 / 32$$

Avec: R : résistance

I: indice sclérométrique.

b- Essai d'auscultation dynamique : [NA EN 12504-4]

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue ; l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée. Cet essai est mesuré de cette façon :



Figure III. 22: l'appareil d'auscultation dynamique (ultrason)

Les résultats de mesure aux Ultrasons :

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM (voir figure I.23) sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connu. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. C'est pour cette raison que par exemple dans les procès verbaux du CNERIB, seuls les appréciations suivantes sont données : (Bouakkaz M, 2012)

- Classements qualitatifs :
 - $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
 - $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
 - $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,
 - $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.
- Estimation de la résistance du béton selon RILEM.

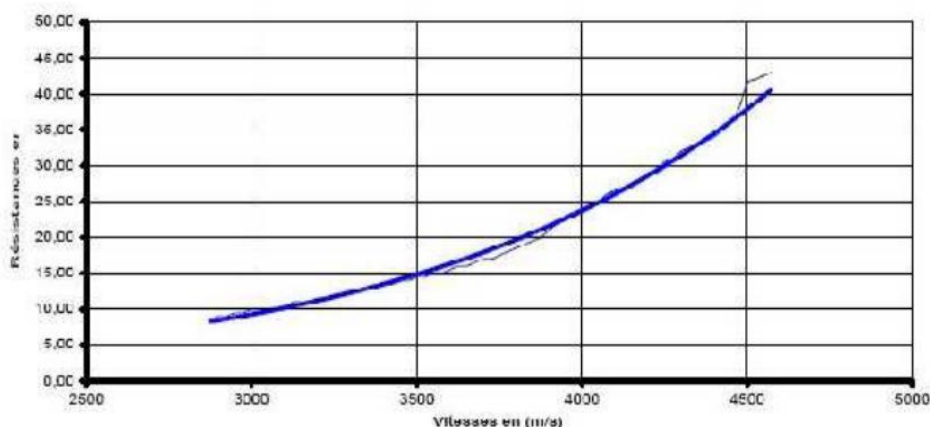


Figure III. 23: courbe RILEM

Conclusion :

Ce chapitre est divisé en deux parties :

La première partie est destinée à la caractérisation des matériaux utilisés (Ciment, les ajouts minéraux, poudre de verre, fumée de silice, superplastifiant, sable et gravier.). Les résultats obtenus d'après les essais exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Bordj Bou Arreridj pour la confection du béton de notre programme expérimental des différentes propriétés chimiques, physiques et mécaniques sont présentées.

La deuxième partie explique la maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle). Nous avons détaillé tous les essais soit à l'état frais ou durci. Avec une description sur le protocole de conception de ce type de béton ainsi que les formules de calcul et les critères fondamentaux de chaque essai.



CHAPITRE IV :
« RESULTATS ET INTERPRETATIONS »

IV.1 : Introduction :

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter et analyser les résultats obtenus des différents essais effectués sur les bétons autoplaçant confectionnés à base des sables avec ajouts (pouzzolane, laitier de haut fourneau).

Les résultats concernant les propriétés des BAP à l'état frais (l'étalement, boîte en L et la stabilisation au tamis), les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité plastique) et les caractéristiques mécaniques (essais destructif (compression et flexion) et essais non destructif (scléromètre et ultra son)) sont présentés dans des tableaux et sous forme de graphes.

D'autre part, ce chapitre est destiné à la modélisation des différents résultats. Cette modélisation est obtenue en utilisant le logiciel Design Expert.

Des représentations graphiques simples sont aussi présentées, expliquées et interprétées de façon à déduire l'influence de chaque paramètre (G/S, FS et le dosage en ciment) utilisés dans la formulation des BAP sur les propriétés rhéologiques et mécaniques.

Partie 01 : Résultats et interprétations

IV.1.1 : BAP à base d'un sable préparé :

IV.1.1.1 : Résultats des propriétés physiques des BAP_{SP} :

Les résultats des essais à l'état frais sont regroupés dans le tableau ci-dessous:

Tableau IV. 1: Les propriétés physiques des différents types des BAP_{SP}.

Type de béton	Étalement (mm)	Écoulement (%)	Stabilisation au tamis (%)
BT₃₅₀	730	100	12,82
BPZ₂₅₀	550	40	0,8
BPZ₃₀₀	650	80	10,14
BPZ₃₅₀	760	100	13,94
BLHF₂₅₀	650	53	2,4
BLHF₃₀₀	690	80	9,94
BLHF₃₅₀	875	100	13,8

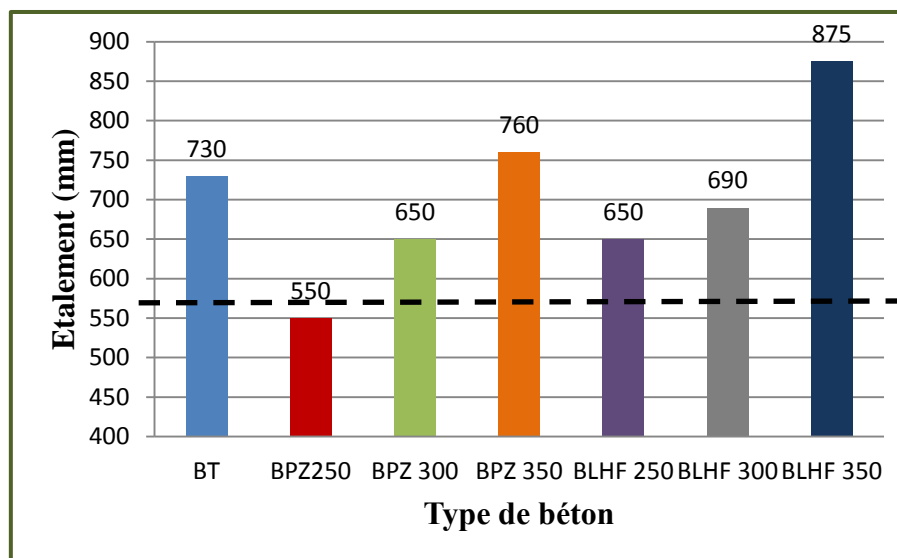


Figure IV. 1: Les variations de l'étalement des différents BAP formulés.

Figure IV.1, représente la variation de l'étalement de béton en fonction des différents types de sable et différents dosage du ciment (350Kg/m^3 , 300Kg/m^3 et 250Kg/m^3), la valeur maximale d'essai c'est inscrit pour les bétons avec des sables qui contiennent des ajouts (15% de pouzzolane ou 15% de laitier), avec un dosage de 350Kg/m^3 par rapport au béton témoin. Les

valeurs minimales sont enregistrées pour les bétons avec un dosage de 250Kg/m^3 (BPZ₂₅₀ et BLHF₂₅₀).

Les meilleures valeurs obtenues des bétons BPZ₃₀₀, BPZ₃₅₀, BLHF₃₀₀ et BLHF₃₅₀ reviennent à leurs enrichissements et homogénéités par les fines ; les mélanges utilisés sont relativement modifiés pour diminuer le frottement entre les grains sans ressuage et ségrégation ce qui permet une meilleure ouvrabilité par la suite.

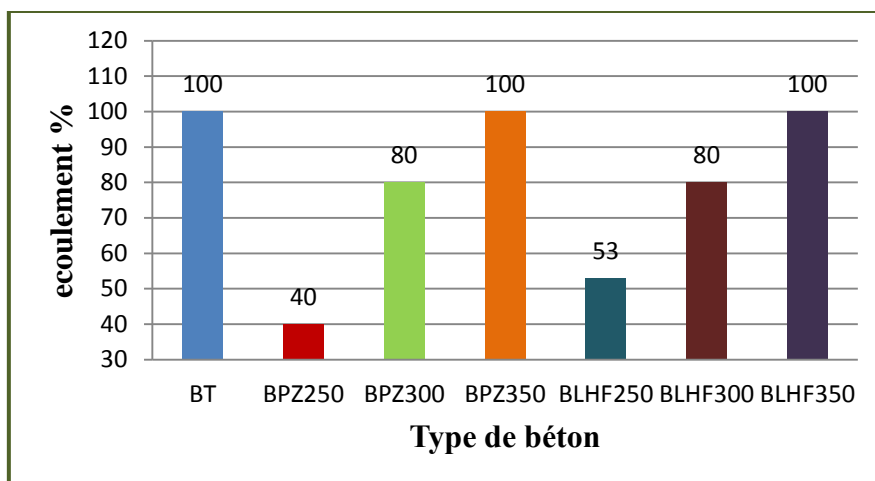


Figure IV. 2: Les variations de l'écoulement des différents BAP formulés.

L'objectif de cet essai est de valoriser la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée, sans qu'il soit contrarié par des phénomènes de blocage inacceptable.

D'après la figure IV.2, on constate que le béton BPZ₂₅₀ et BLHF₂₅₀ donne une valeur inférieure par rapport à la norme ($h_2/h_1 \geq 80\%$) à cause du faible volume de la pâte (dosage de ciment 250Kg/m^3)

Les valeurs d'écoulement obtenues des bétons (BT, BPZ₃₀₀, BPZ₃₅₀, BLHF₃₀₀, BLHF₃₅₀) sont acceptables par rapport à la norme $\geq 80\%$, ce qui est justifié par plusieurs facteurs ; le diamètre des granulats $D_{\max} < 16\text{ mm}$; un dosage du ciment acceptable, les grains fins qui aident à obtenir un bon écoulement sans frottement et sans blocage lors du coulage du béton frais à son état rhéologique frais.

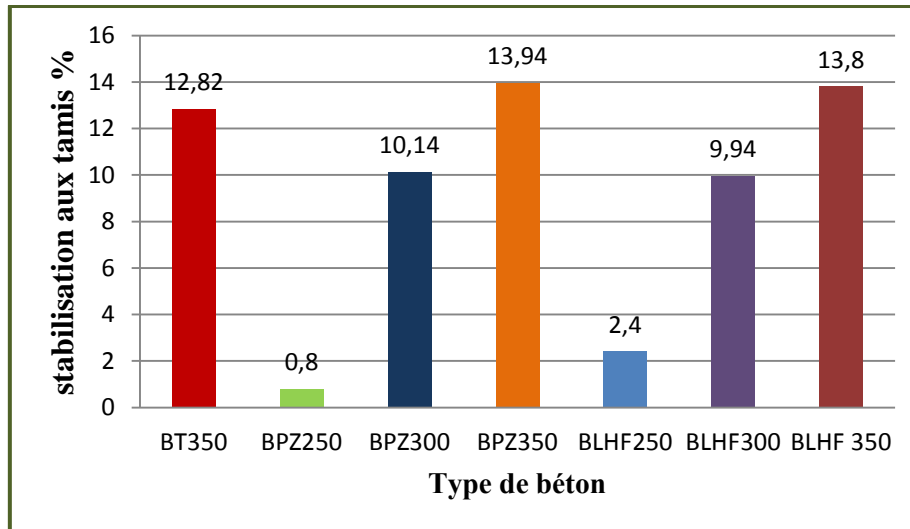


Figure IV. 3: Les variations de la stabilisation aux tamis des différents BAP_{SP} formulés.

D'après la figure IV.3, tous les types des BAP_{SP} réalisés indiquent une bonne stabilité au tamis et une bonne homogénéité sans ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BAP dictée par les normes (la laitance < 15 %), pour tous les BAP validés, ce qui est justifié par l'influence des grains fins et le rôle de superplastifiant qui diminue la quantité d'eau dans les bétons et la défloculation des grains.

IV.1.1.2: Comportement rhéologique des BAP_{SP}:

Tableau IV. 2: Les paramètres rhéologiques des différents types de BAP_{SP}

Types de béton	Equation d'ajustement	Paramètres de Bingham		Coefficient corrélatif (R ²)
		La viscosité plastique μ (Pa.s)	Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)	
BT ₃₅₀	$\tau = 49,578\gamma + 0,091$	49,578	0,091	1,00
BPZ ₂₅₀	$\tau = 176,338\gamma + 93,216$	176,338	93,216	0,99
BPZ ₃₀₀	$\tau = 67,718\gamma + 0,091$	67,718	0,091	1,00
BPZ ₃₅₀	$\tau = 107,290\gamma + 0,091$	107,290	0,091	1,00
BLHF ₂₅₀	$\tau = 96,509\gamma + 0,091$	96,509	0,091	0,99
BLHF ₃₀₀	$\tau = 80,837\gamma + 0,091$	80,837	0,091	0,99
BLHF ₃₅₀	$\tau = 50,841\gamma + 0,091$	50,841	0,091	0,99

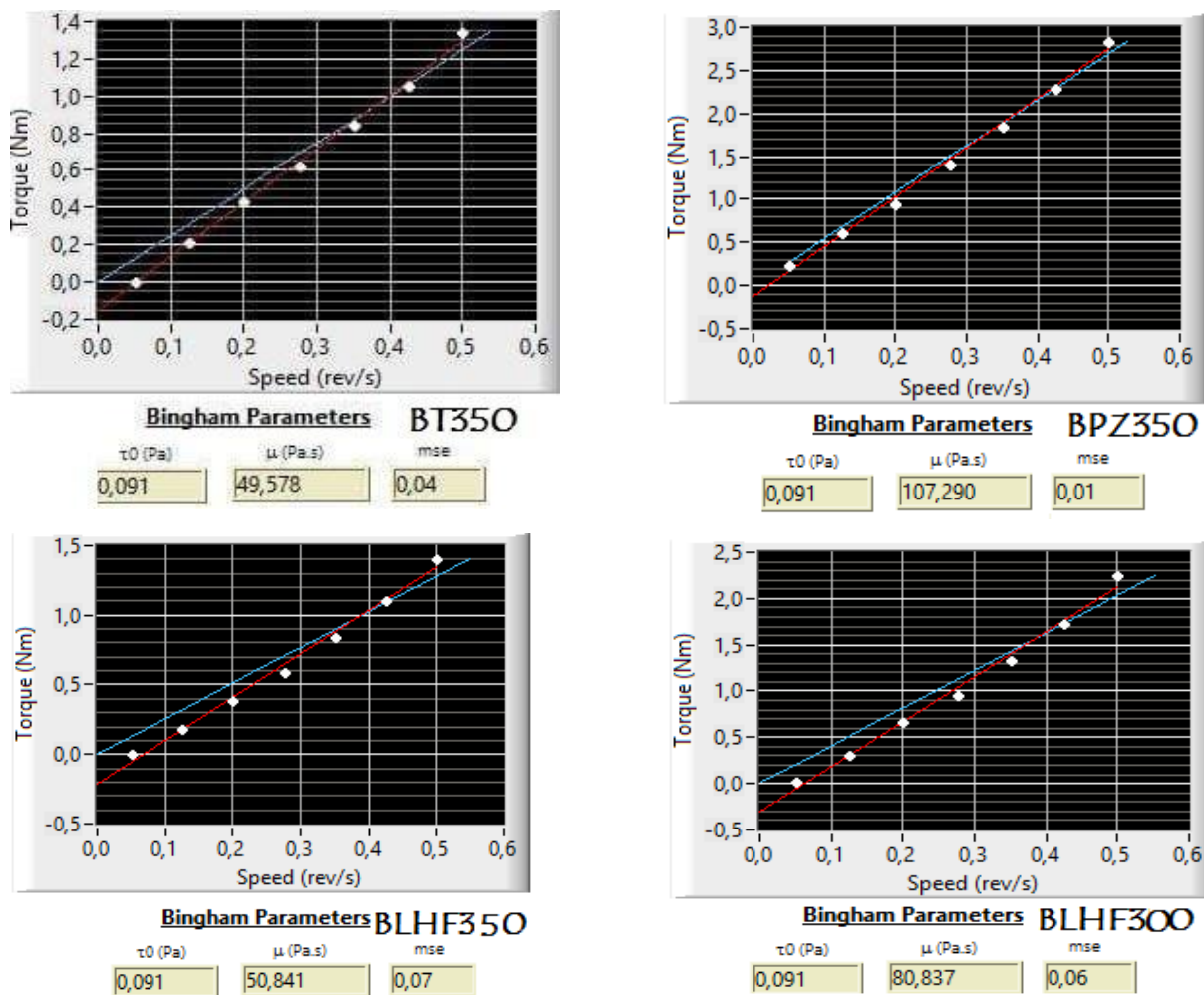


Figure IV. 4: Diagramme de vitesse-couple (Speed-Torque) affiché par ICAR- Rhéomètre

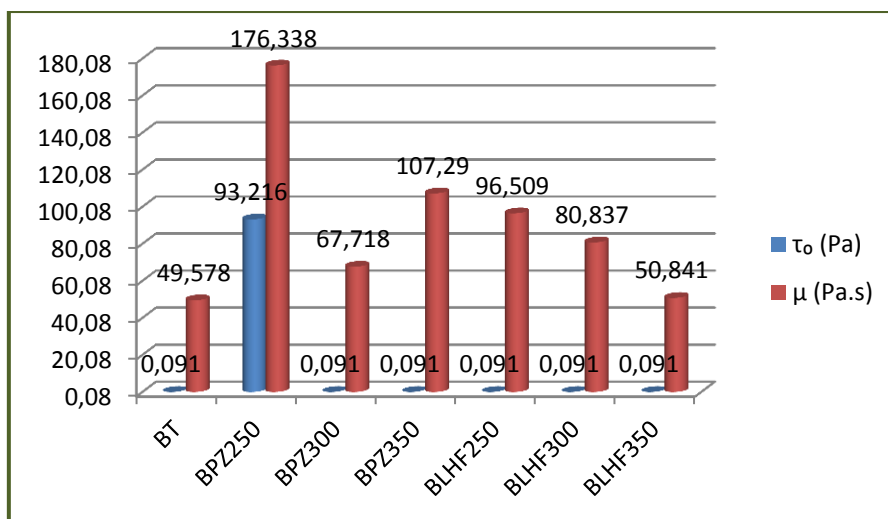


Figure IV. 5: Valeurs du seuil de cisaillement et la viscosité des BAP_{PS}.

Le tableau IV.2 représente le comportement rhéologique des BAP_{SP}, la plus part des BAP_{SP} ont un seuil de cisaillement proche de 0 (0.091Pa), sauf le BPZ₂₅₀ qui a une valeur de (93.216 Pa).

Les BAP_{SP} à base d'un sable préparé (BLHF et BPZ) ont des viscosités plastiques supérieures à celle du BT₃₅₀.

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

On peut dire que : la nature et la finesse des ajouts ainsi que le dosage en ciment ont un effet sur le seuil de cisaillement et la viscosité du BAP.

Le BAP doit avoir un seuil de cisaillement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement et leur viscosité doit être modérée pour limiter le temps d'écoulement.

IV.1.1.3 : Comportement mécanique des BAP_{SP} :

A- Essais destructif :

1- Résistance de compression :

Tableau IV. 3: Evolution de la résistance à la compression du BAP_{SP} au cours du temps.

Type de béton	La résistance à la compression à 7j (MPa)	La résistance à la compression à 14j (MPa)	La résistance à la compression à 28j (MPa)	La résistance à la compression à 60j (MPa)
BT₃₅₀	32,10	42,820	51,223	54,250
BPZ₂₅₀	31,65	40,750	41,24	46,214
BPZ₃₀₀	36,00	44,114	47,84	56,00
BPZ₃₅₀	36,67	45,910	56,012	68,534
BLHF₂₅₀	41,20	43,600	53,702	59,53
BLHF₃₀₀	40,80	46,81	55,82	61,00
BLHF₃₅₀	56,15	62,35	63,47	67,350

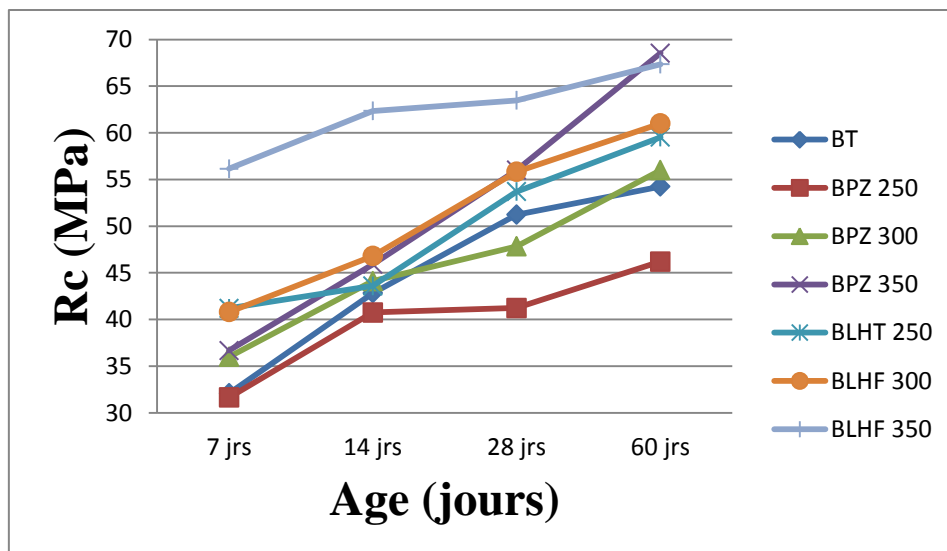


Figure IV. 6: La variation de la résistance à la compression des différents type de béton au cours du temps.

Tableau IV. 4: Taux d'évolution partiel des réponses mécaniques des btons formulée.

Type de béton	7jrs – 14 jrs (%)	14 jrs - 28 jrs (%)	28 jrs – 60 jrs (%)
BT ₃₅₀	33,4	19,62	5,91
BPZ ₂₅₀	28,74	1,20	12,06
BPZ ₃₀₀	22,54	8,45	17,06
BPZ ₃₅₀	25,20	21,98	22,38
BLHF ₂₅₀	5,83	23,17	10,82
BLHF ₃₀₀	14,73	19,25	9,28
BLHF ₃₅₀	11,04	1,80	6,11

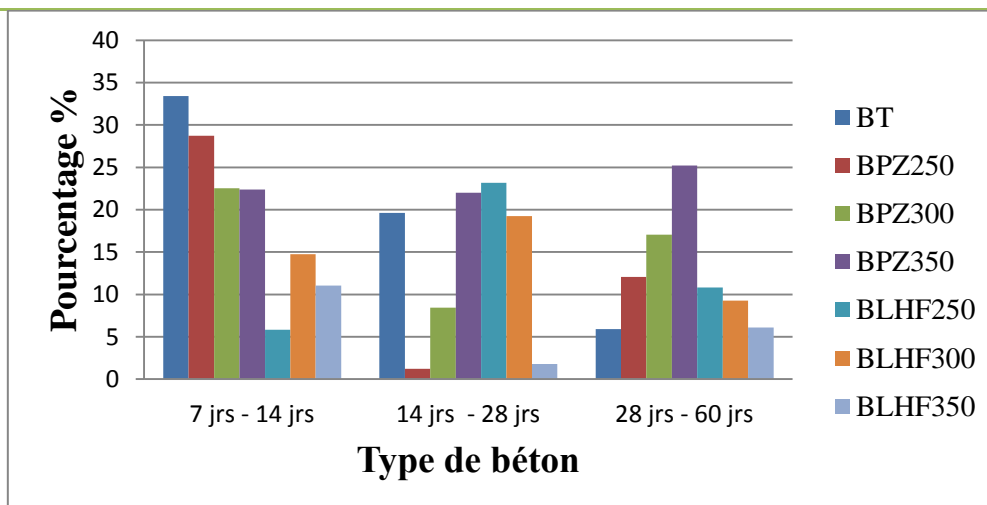


Figure IV. 7: Taux d'évolution des réponses mécanique des bétons formulée à base de sable préparé.

D'après les résultats présentés au niveau de la figure IV.6 et la figure IV.7, on remarque clairement que le développement de la résistance à la compression croît progressivement au cours du temps ;

La résistance à la compression est plus élevée pour les bétons à base de sable avec ajout de laitier à tout âge et qui atteint une meilleure résistance de 67,350 MPa à 60 jours pour le béton (BLHF₃₅₀), par rapport aux bétons témoin (54,250 MPa) et béton à base d'un sable avec ajout de pouzzolane.

On observe que le taux d'évolution de la résistance du béton témoin (BT₃₅₀) à court terme est assez élevée (33,4%), en revanche les bétons à base des sables qui contiennent du laitier et de la pouzzolane manifestent à long terme.

On note que les valeurs obtenues de la résistance à la compression (R_c) sont meilleures pour les bétons à base des sables avec ajout comparativement à un béton témoin (BT). Ce qui met en évidence le bénéfice de l'utilisation du laitier et de la pouzzolane à cause de leurs pouvoirs hydrauliques et pouzzolanique qui conduisent à la formation du C-S-H, d'ettringite et d'aluminate de calcium hydraté.

2- Essai de traction par flexion :

Tableau IV. 5: Evolution de la résistance à la flexion des BAP_{SP}.

Type de béton	La résistance à la flexion à 7j (MPa)	La résistance à la flexion à 14j (MPa)	La résistance à la flexion à 28j (MPa)
BT₃₅₀	4,055	4,930	5,264
BPZ 250	4,655	5,35	5,100
BPZ 300	4,690	4,789	5,865
BPZ 350	5,550	5,730	5,943
BLHF 250	5,054	5,271	5,117
BLHF 300	6,100	6,160	6,572
BLHF 350	6,378	6,823	6,927

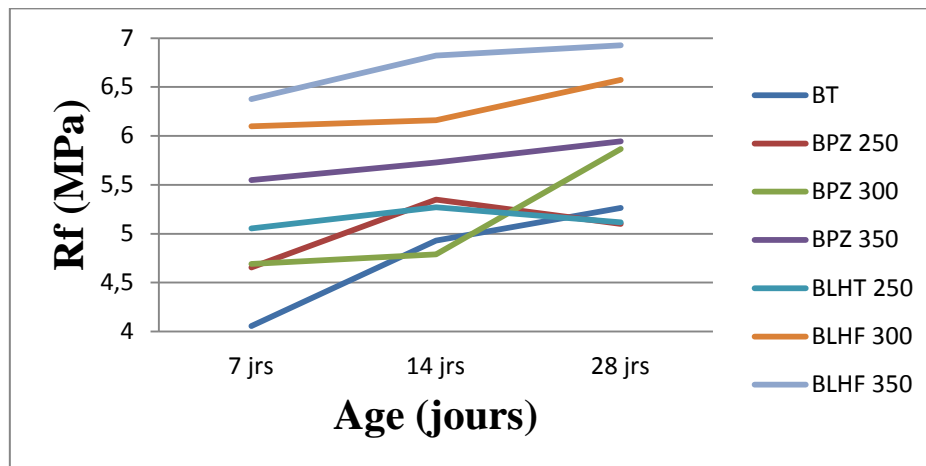


Figure IV. 8: La variation de la résistance à la flexion des différents type de béton au cours du temps.

La figure IV.8 représente l'évolution de la résistance en traction par flexion pour les BAP_{SP}, d'après les résultats obtenus on remarque que la résistance en traction par flexion augmente en fonction de l'âge, cette augmentation est due à l'hydratation du ciment avec le temps. On observe aussi une augmentation considérable de la résistance du BPZ₃₅₀ et BLHF₃₅₀ par rapport aux autres bétons.

On constate finalement que l'effet des ajouts au sein des mélanges sur la réponse mécanique à la compression et à la flexion est semblable.

Essais non destructif :

1- Essai au scléromètre :

Tableau IV. 6: La résistance à la compression obtenue par l'essai au scléromètre.

Type de béton	Résistance à la compression (MPa)
BT₃₅₀	40,5
BPZ₂₅₀	36
BPZ₃₀₀	45
BPZ₃₅₀	41
BLHF₂₅₀	42
BLHF₃₀₀	43
BLHF₃₅₀	51

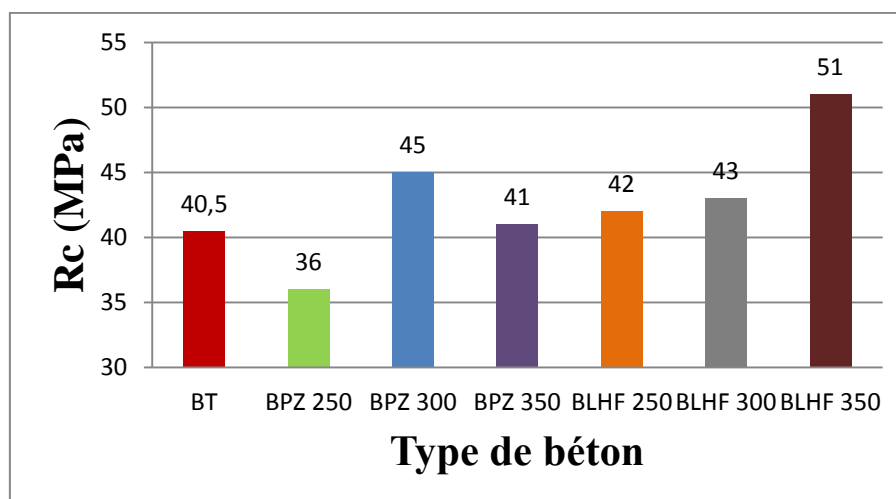


Figure IV. 9: La résistance à la compression obtenue par l'essai au scléromètre des BAP_{SP}. D'après les résultats obtenus, on peut dire que le même développement de résistance est constaté pour l'essai au scléromètre (END) d'une manière similaire à celle de l'essai direct d'écrasement de la résistance caractéristique à la compression à 28 jours.

2- Essai d'auscultation dynamique :

Tableau IV. 7: la vitesse de propagation des ultra son pour les BAP_{SP}

Type de béton	Vitesse de propagation des ultra son
BT₃₅₀	4597
BPZ₂₅₀	4448
BPZ₃₀₀	4504
BPZ₃₅₀	4730
BLHF₂₅₀	4667
BLHF₃₀₀	4697
BLHF₃₅₀	4766

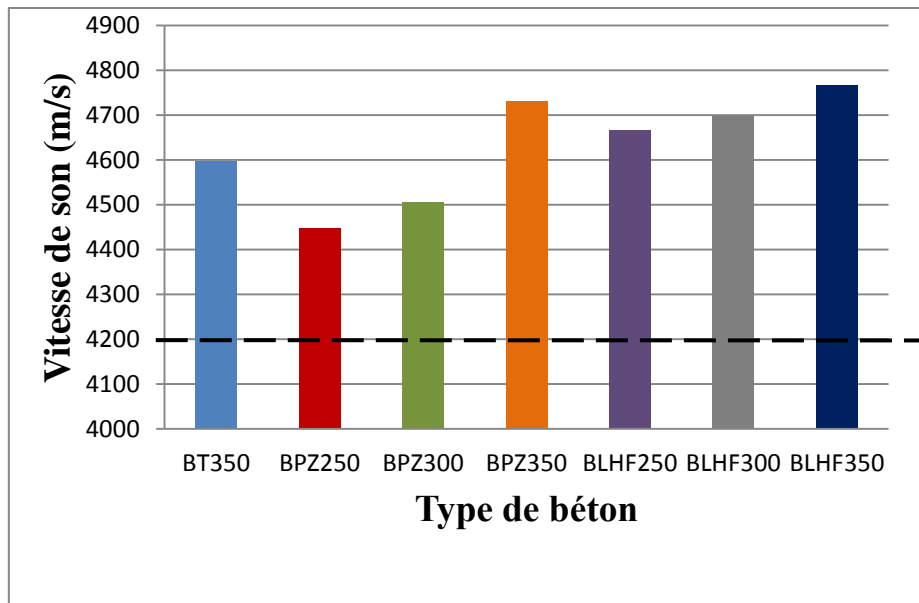


Figure IV. 10: Vitesse de son des différents types de béton.

Selon les résultats obtenues dans le tableau IV.7 et la figure IV.10 on constate que la vitesse de propagation du son de tous les types de béton est supérieure à 4200 m/s donc ces bétons à très haute résistance.

Ces résultats nous pouvons être justifiées par les vides (la masse volumique) et l'homogénéité des granulats et le bon étalement et bon écoulement et bon résistants à ségrégations dans les bétons et par l'influence des fins, notez que l'augmentation de vitesse de son liée à la diminution des vides interne pour obtenir un bon résultat.

IV.1.2 : BAP réalisés par le plan d'expérience :

IV.1.2.1 : Caractéristiques physiques des BAP_{PX} à l'état frais :

Les résultats des essais à l'état frais sont regroupés dans le tableau ci-dessous:

Tableau IV. 8: les propriétés des BAP_{PX} à l'état frais.

N°	G/S	FS (%)	Ciment (Kg/m ³)	Etaiement (mm)	Ecoulement (%)	Stabilisation au tamis (%)
1	1,15	5	350	705	100	9,84
2	1	10	400	750	100	7,1
3	0,85	5	350	650	80	5,2
4	0,85	5	400	665	100	2,01
5	1	15	400	785	100	12,8
6	1	5	350	655	80	4,16
7	1,15	15	400	735	100	4,9
8	1	10	400	745	100	14,92
9	1	10	350	640	80	7,3
10	0,85	10	350	700	100	4,6
11	1	10	400	750	100	7,1
12	1	10	350	640	50	3,14
13	1,15	10	400	645	80	2,08
14	0,85	15	400	715	100	8,96
15	1,15	15	350	645	80	5,44
16	1	10	400	735	100	14,92
17	0,85	15	350	635	50	4,08
18	1	10	350	640	80	7,3
19	1	5	400	740	100	5,5
20	1	10	350	640	50	3,14
21	0,85	10	400	710	100	13
22	1	15	350	650	80	4,08
23	1,15	5	400	752,5	100	9,48
24	1	10	400	735	100	14,92
25	1	10	350	640	80	7,3
26	1,15	10	350	700	100	7,3

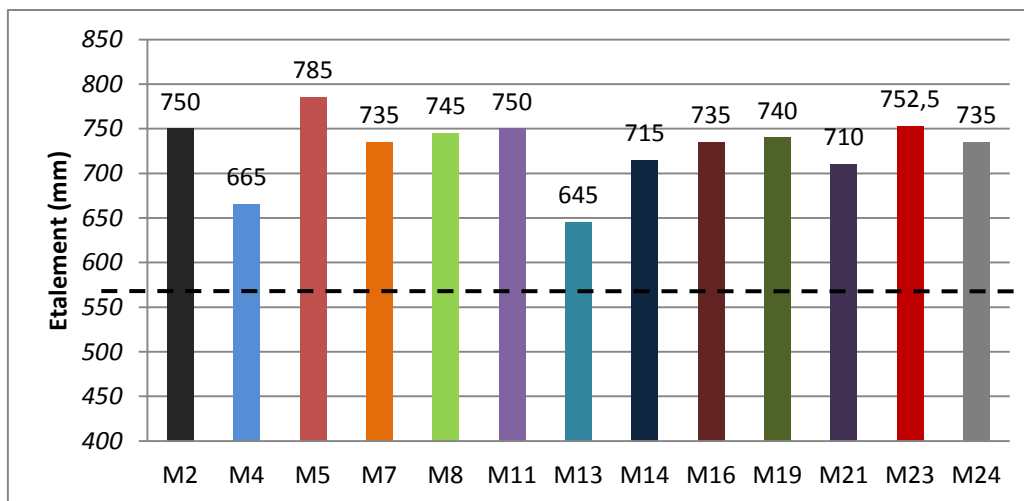


Figure IV. 11: La variation d'étalement des BAP_{PX} pour le dosage 400 Kg/m³.

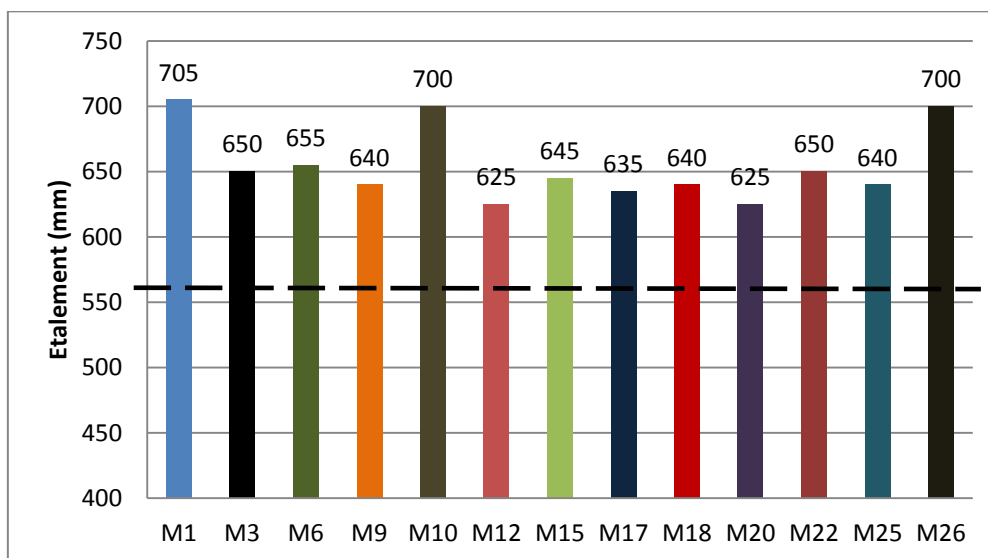


Figure IV. 12: La variation d'étalement des BAP_{PX} pour le dosage 350Kg/m³

Les figures IV.11 et IV.12, représentent la variation de l'étalement des mélanges des BAP_{PX} quelque soit le dosage de ciment sont supérieur à 550mm a cause du fort volume de la patece qui donne une bonne homogénéité.

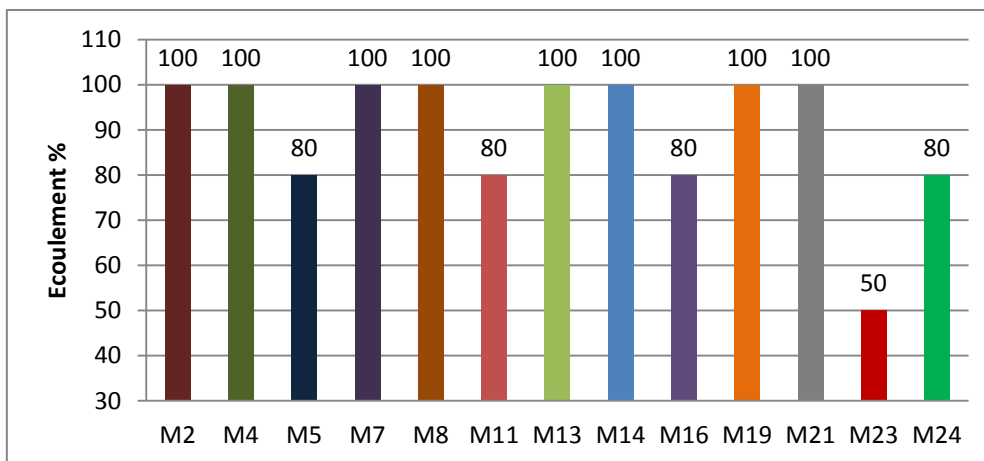


Figure IV. 13: La variation d'écoulement des BAP_{PX} pour le dosage 400 Kg/m³

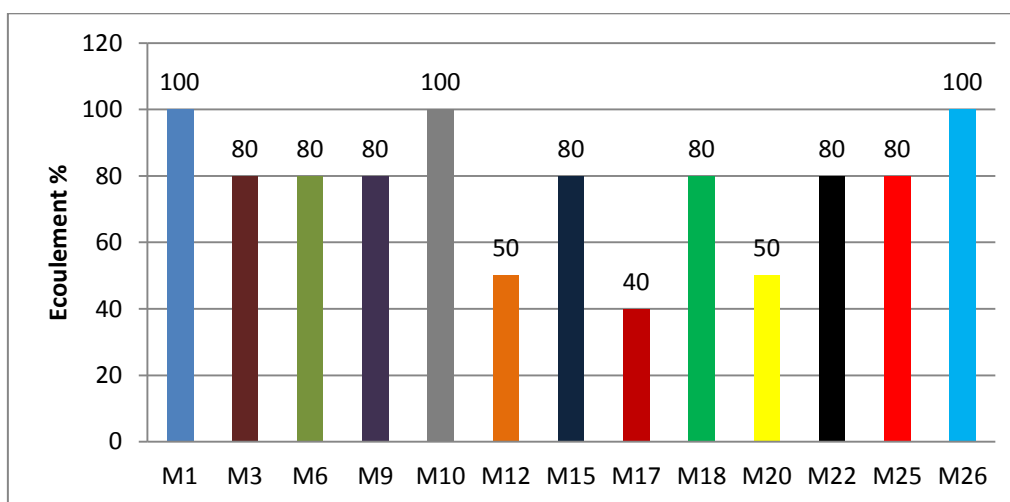


Figure IV. 14: La variation d'écoulement (en %) des BAP_{PX} pour le dosage 350 Kg/m³

Les résultats obtenus par l'essai de la boîte en L sont présentés sur les figures IV.13 et IV.14, ce type d'essai permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un milieu confiné. La plupart des BAP_{PX} étudiés enregistrent des indices de ségrégation $\geq 80\%$ estimé acceptable par ce test selon les normes en vigueur pour les bétons autoplaçants.

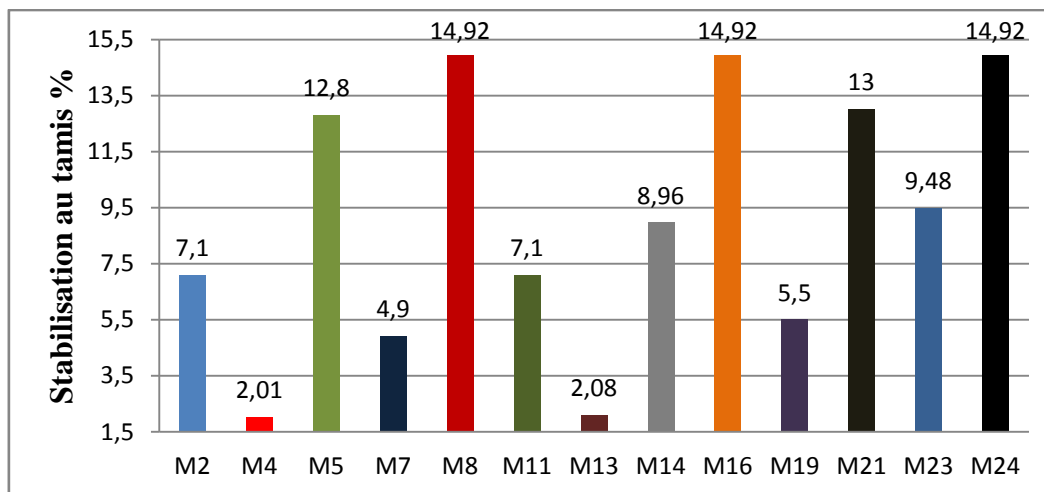


Figure IV. 15: La variation de la stabilité aux tamis des BAP_{PX} pour le dosage 400Kg/m³

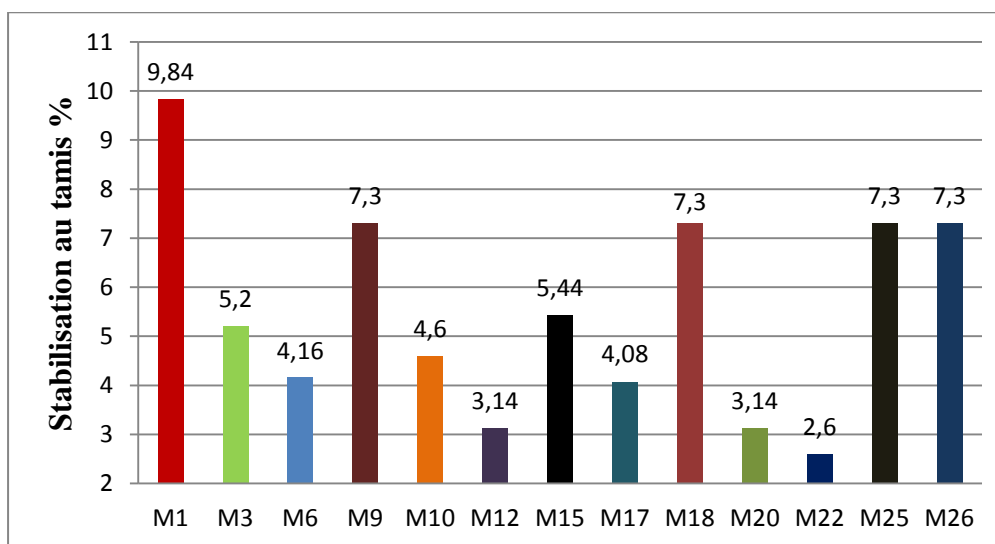


Figure IV. 16: La variation de la stabilité aux tamis des BAP_{PX} pour le dosage 350 kg/m³

D'après les figures IV.15 et IV.16, tous les mélanges des BAP_{PX} réalisés indiquent une bonne stabilité au tamis et une bonne homogénéité sans ségrégation statique. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BA dictée par les normes (la laitance <15 %), pour tous les BAP validés, ce qui est justifié par l'influence des grains fins et le rôle de superplastifiant qui diminue la quantité d'eau dans les bétons et la défloculation des grains.

IV.1.2.2 : Résultats des essais réalisés sur BAP_{PX} à l'état durci :

Tableau IV. 9: la variation de la résistance à la compression des mélanges.

N°	G/S	FS (%)	CIM (Kg/m ³)	Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	Résistance à la compression à 14 jours (MPa)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)
1	1,15	5	350	47.63	51.31	58.81
2	1	10	400	45.62	46.49	56.74
3	0,85	5	350	34.701	36.413	40.71
4	0,85	5	400	43.54	49.69	53.52
5	1	15	400	43.12	54.38	57.42
6	1	5	350	37.5	41	49
7	1,15	15	400	42	47.43	53.48
8	1	10	400	35.502	47.34	57.142
9	1	10	350	32.17	37.63	42.35
10	0,85	10	350	29.804	34.24	37.35
11	1	10	400	45.62	46.49	56.74
12	1	10	350	41.3	48.502	49.06
13	1,15	10	400	42.7	53.73	55.11
14	0,85	15	400	38.18	47.3	49.87
15	1,15	15	350	36.22	41.21	46.4
16	1	10	400	35.502	47.34	57.142
17	0,85	15	350	42.97	45.9	50.84
18	1	10	350	32.17	37.63	42.35
19	1	5	400	37.07	43.33	50.411
20	1	10	350	41.3	48.502	49.06
21	0,85	10	400	41.188	45	49.124
22	1	15	350	49.05	44.93	51.73
23	1,15	5	400	42.434	48.4	57.12
24	1	10	400	35.502	47.34	57.142
25	1	10	350	32.17	37.63	42.35
26	1,15	10	350	38.75	47.1	50.9

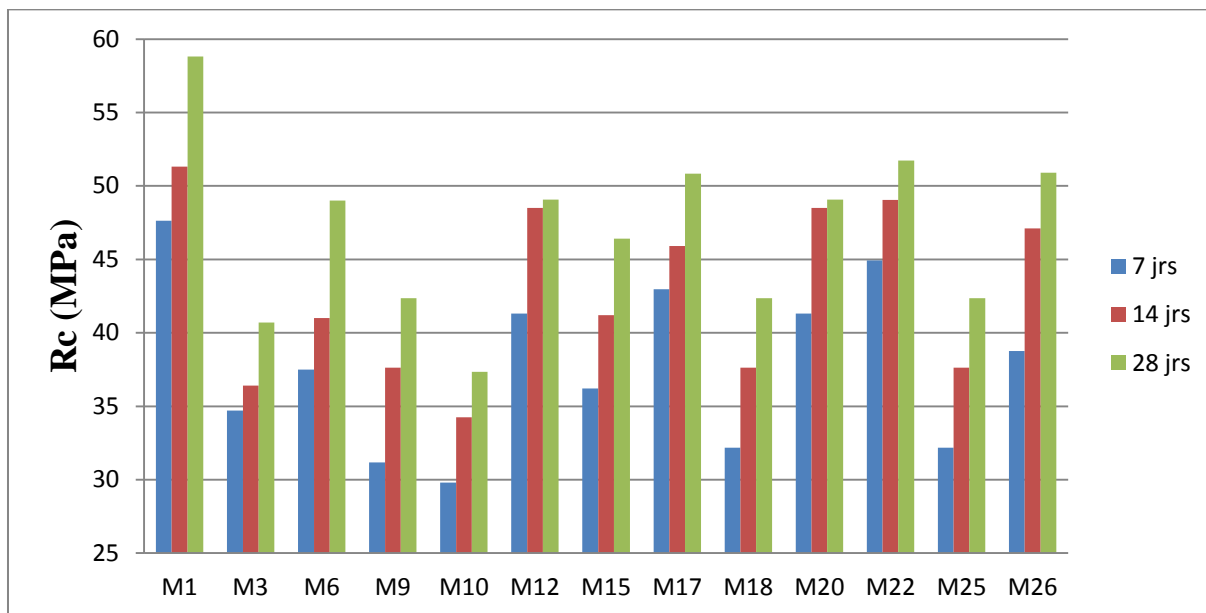


Figure IV. 17: Evolution de la résistance à la compression des BAP_{PX} pour le dosage de ciment 350Kg/m³

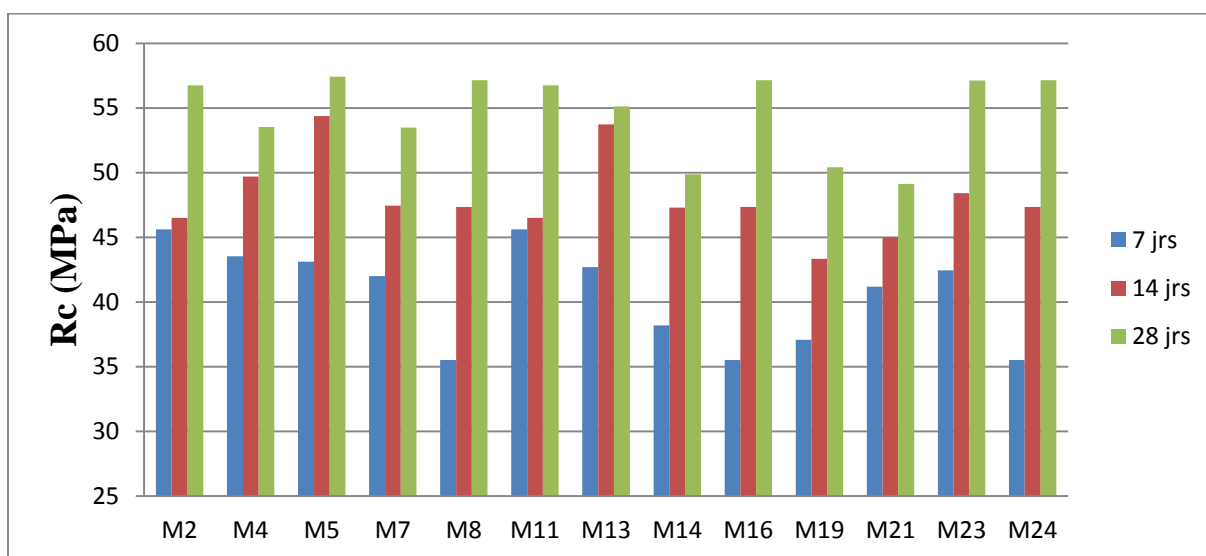
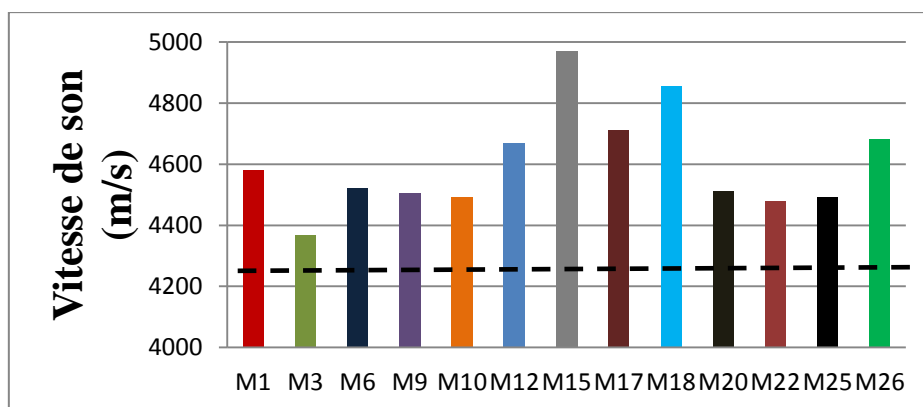


Figure IV. 18: Evolution de la résistance à la compression des BAP_{PX} pour un dosage de 400Kg/m³.

Selon le Tableau IV.13 et les figure IV.17 et IV.18, on remarque clairement que le développement de la résistance à la compression croit progressivement au cours du temps pour tous les mélanges réalisés. C'est à cause à la fumée de silice (FS) qui est composée principalement de SiO₂ ; qui accélère l'hydratation du C₃S, ce qui améliore les résistances aux jeunes âges.

Tableau IV. 10: la vitesse de propagation du son des 26 mélanges des BAP_{PX}.

N°	G/S	FS (%)	CIM (Kg/m ³)	Vitesse de propagation du son (m/s)
1	1,15	5	350	4582
2	1	10	400	4642
3	0,85	5	350	4368
4	0,85	5	400	4523
5	1	15	400	4454
6	1	5	350	4523
7	1,15	15	400	4423
8	1	10	400	4760
9	1	10	350	4504
10	0,85	10	350	4492
11	1	10	400	4446
12	1	10	350	4670
13	1,15	10	400	4789
14	0,85	15	400	4417
15	1,15	15	350	4969
16	1	10	400	4818
17	0,85	15	350	4711
18	1	10	350	4855
19	1	5	400	4607
20	1	10	350	4511
21	0,85	10	400	4629
22	1	15	350	4479
23	1,15	5	400	4760
24	1	10	400	4732
25	1	10	350	4492
26	1,15	10	350	4683

**Figure IV. 19:** Vitesse de son des BAP_{PX} pour le dosage 350 Kg/m³.

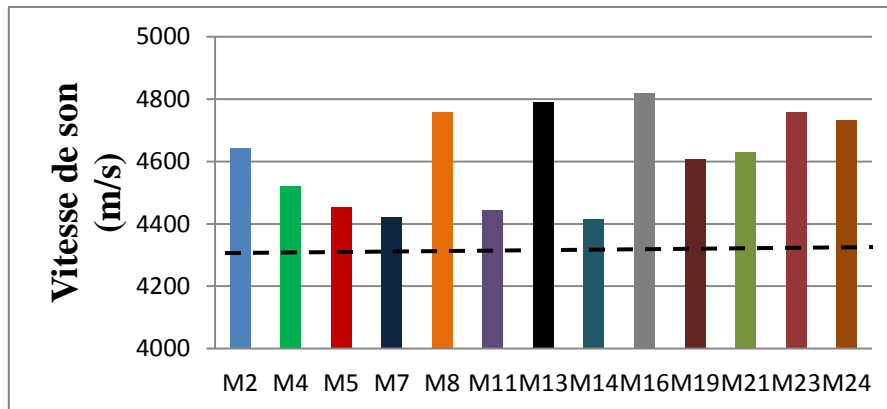


Figure IV. 20: Vitesse de son des BAP_{PX} pour un dosage de 400Kg/m³

Selon les figures IV.19 et IV.20, on remarque une vitesse de propagation du son qui est au-delà de 4200 m/s, ce qui signifie que la qualité de l'ensemble des BAP préparés est jugé acceptable.

Ces résultats peuvent être justifiées par la bonne homogénéité des BAP formulés à cause de la bonne distribution granulométrique, ce qui influe d'une manière significative sur la compacité du mélange à l'état durci, les bonnes performances sont abouti pour les formulations optimisées (**G/S entre 1 et 1,15 et FS entre 10 et 15%**) pour le dosage en ciment **350Kg/m³**, et (**G/S entre 1 et 1,15 et FS = 10 %**) pour le dosage en ciment **400Kg/m³**. Ces hautes performances à l'état frais peuvent être remarquées aussi par le comportement des BAP formulés lors des tests de l'étalement et le bon écoulement observé pour la majorité des mélanges et la bonne résistance au ressuage et à la ségrégation après le test de stabilité au tamis.

IV.1.2.3 : les caractéristiques rhéologiques des BAP_{PX}:Tableau IV. 11: les caractéristiques rhéologiques des mélanges de BAP_{PX}.

N°	Equation d'ajustement	Paramètres de Bingham		Coefficient corrélatif (R ²)
		La viscosité plastique μ (Pa.s)	Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)	
1	$\tau = 119,058 + 0,091\dot{\gamma}$	119,058	0,091	0,99
2	$\tau = 93,264\dot{\gamma} + 0,091$	93,264	0,091	1,00
3	$\tau = 81,619\dot{\gamma} + 17,710$	81,619	17,710	1,00
4	$\tau = 123,121\dot{\gamma} + 0,091$	123,121	0,091	1,00
5	$\tau = 67,718\dot{\gamma} + 0,091$	67,718	0,091	1,00
6	$\tau = 95,755\dot{\gamma} + 6,205$	95,755	6,205	1,00
7	$\tau = 97,988\dot{\gamma} + 0,091$	97,988	0,091	1,00
8	$\tau = 61,876\dot{\gamma} + 0,490$	61,876	0,490	1,00
9	$\tau = 94,264\dot{\gamma} + 18,607$	94,264	18,607	1,00
10	$\tau = 19,797\dot{\gamma} + 0,091$	19,797	0,091	0,98
11	$\tau = 93,264\dot{\gamma} + 0,091$	93,264	0,091	1,00
12	$\tau = 81,280\dot{\gamma} + 8,994$	81,280	8,994	0,99
13	$\tau = 136,383\dot{\gamma} + 0,091$	136,383	0,091	0,99
14	$\tau = 110,358\dot{\gamma} + 11,757$	110,358	11,757	1,00
15	$\tau = 105,462\dot{\gamma} + 6,404$	105,462	6,404	0,99
16	$\tau = 61,876\dot{\gamma} + 0,490$	61,876	0,490	1,00
17	$\tau = 142,962\dot{\gamma} + 18,727$	142,962	18,727	1,00
18	$\tau = 94,409\dot{\gamma} + 18,607$	94,409	18,607	1,00
19	$\tau = 62,653\dot{\gamma} + 2,697$	62,653	2,697	1,00
20	$\tau = 81,280\dot{\gamma} + 8,994$	81,280	8,994	0,99
21	$\tau = 48,183\dot{\gamma} + 0,788$	48,183	0,788	0,99
22	$\tau = 176,338\dot{\gamma} + 46,5$	176,338	46,5	1,00
23	$\tau = 53,915\dot{\gamma} + 4,815$	53,915	4,815	1,00
24	$\tau = 61,876\dot{\gamma} + 0,490$	61,876	0,490	1,00
25	$\tau = 94,409\dot{\gamma} + 18,607$	94,409	18,607	1,00
26	$\tau = 61,408\dot{\gamma} + 0,091$	61,408	0,091	1,00

Les deux diagrammes ci-dessous présentent un exemple

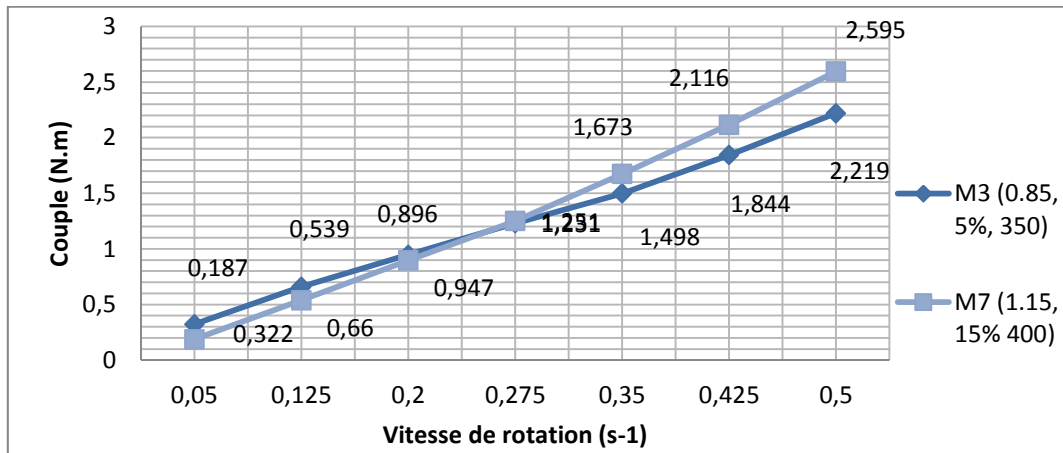


Figure IV. 21: Diagramme vitesse-couple pour BAP_{PX} du M3 (G/S= 0.85, FS= 5%, CIM= 350Kg/m³) et M7 (G/S= 1.15, FS= 15%, CIM= 400Kg/m³).

Partie 02 : modélisation et analyse des résultats

Thixotropie

La thixotropie est caractérisée par une diminution réversible de la viscosité apparente lors d'une sollicitation à vitesse constante. Cette propriété est généralement caractéristique des suspensions floculées. Elle est liée à la destruction progressive des floccs sous cisaillement. Les rhéogrammes de telles suspensions présentent une boucle d'hystérésis, c'est à dire que la courbe de montée en cisaillement ne coïncide pas avec la courbe de descente [Ferraris CF].

Dans le cas de notre étude expérimentale ; les BAP formulé ont une suspension que l'on peut assimiler généralement à un corps de Bingham. Bien que plusieurs études du comportement rhéologique des matériaux cimentaires aient été effectuées, il est encore difficile de donner une définition exacte des propriétés de ces derniers à cause de la multitude des facteurs qui influencent ce comportement rhéologique [Hu C., de Larrard F].

02/1 : Modélisation des paramètres rhéologiques

Introduction

La rhéologie des matériaux cimentaires est liée et à leurs compositions et à la compacité du mélange obtenue. La quantité d'eau entourant les grains solides contribue efficacement à expliquer le comportement rhéologique des mélanges cimentaire (E/C). Bien que, certaines additions fines (G/S et FS) modifient la surface spécifique totale et améliorent la compacité, leur effet sur le comportement rhéologique reste limité à cause de leur activité de surface et leur interaction avec le superplastifiant.

IV.2.1 : seuil de cisaillement :

Le logiciel sélectionne le modèle du plus grand degré où les termes additionnels sont significatifs. Etant ceci, nous allons analyser les différents résultats trouvés sous la base de ce modèle mathématiques mentionnés par le logiciel et ceci pour avoir plus d'explication, d'interprétation et de compréhension du rôle joué par chaque constituant dans la variation de la résistance, il permet aussi une comparaison numérique entre les valeurs mesurées et celles obtenues par ce modèles.

Les modèles choisis pour représenter la variation du seuil de cisaillement, la viscosité et la

résistance à la compression R_{c28jrs} en fonction du rapport G/S, fumée de silice % et du dosage du ciment est le modèle cubique. Cependant les autres modèles mathématiques satisfont les tests statistiques et ont l'air de présenter une modélisation moins significative.

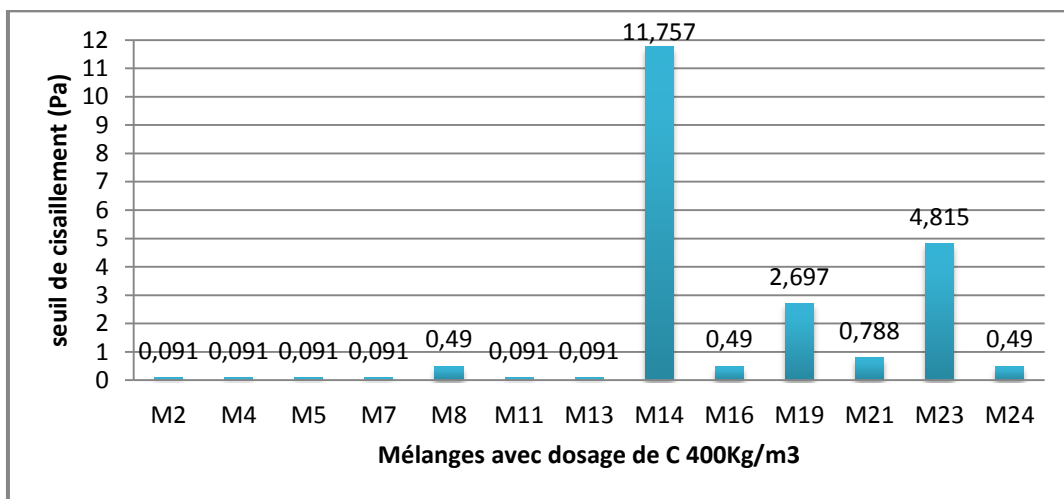
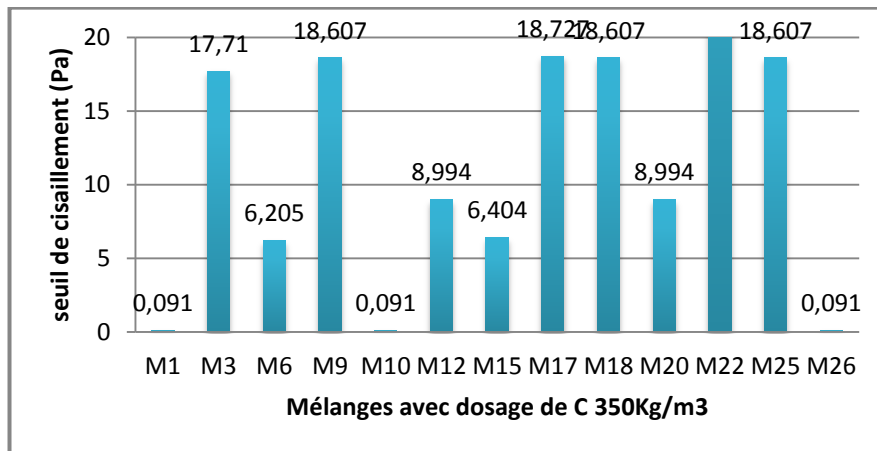


Figure IV. 22: Les valeurs de seuil de cisaillement de chaque mélange pour les deux dosages en ciment (350 et 400 Kg/m³).

Tableau IV. 12: sommaire statistique des modèles pour le seuil de cisaillement

Source	R-Squared
Linear	0.4122
Quadratic	0.6159
Cubic	0.8444 <u>Suggested</u>

Par définition le seuil de cisaillement (τ_0) est la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes) .ou autrement dit c'est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines. Par rapport aux ultrafine et dans notre cas d'étude où nous avons varié les trois paramètres influent directement le taux des fine dans la pâte de ciment (G/S, C et FS) et d'après les résultats obtenus, on peut signaler l'effet important du taux des ultrafines (G/S et FS) et du dosage en ciment sur les paramètres rhéologiques des BAP formulés (seuil de cisaillement et viscosité). Donc, il devient plus intéressant de trouver une relation qui relie chaque paramètre rhéologique avec la composition du BAP. Sur la base de plusieurs corrélations et de modèles proposés, la relation suivante a été arrêtée pour le seuil de cisaillement et qui s'exprime par l'équation suivante :

EQUATION FINALE DU MODELE CUBIQUE (seuil de cisaillement τ)

$$\tau = +7.43 -0.17* G/S +9.42 * FS +7.47* CIM -6.86* G/S^2 +6.75* FS^2 -1.39 * G/S * FS -1.86* G/S * CIM +3.61* FS* CIM -7.64 * G/S^2 * FS -8.27 * G/S^2 * CIM -4.44* G/S* FS^2 +4.39 * FS^2 * CIM +2.71 * G/S * FS * CIM$$

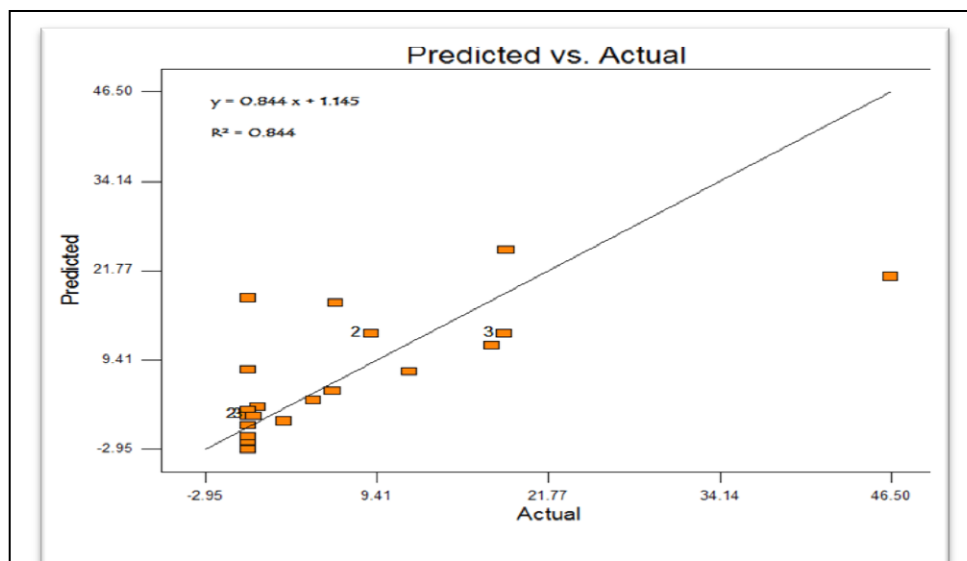


Figure IV. 23: Courbe de tendance des valeurs observées et des valeurs prévues selon modèle du seuil de cisaillement.

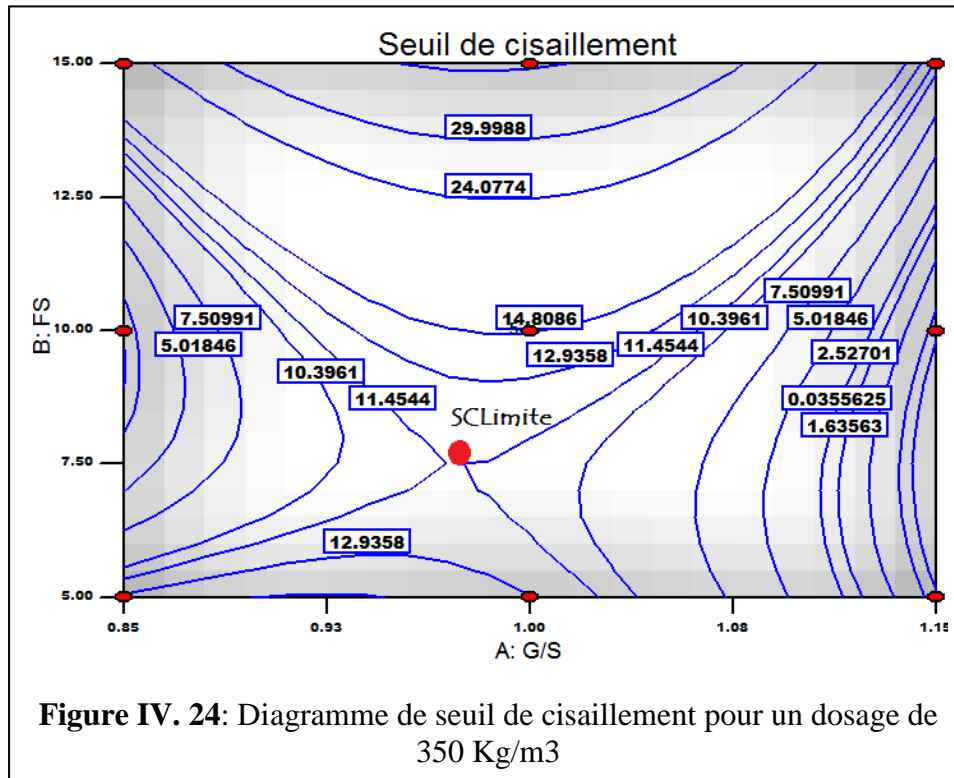


Figure IV. 24: Diagramme de seuil de cisaillement pour un dosage de 350 Kg/m³

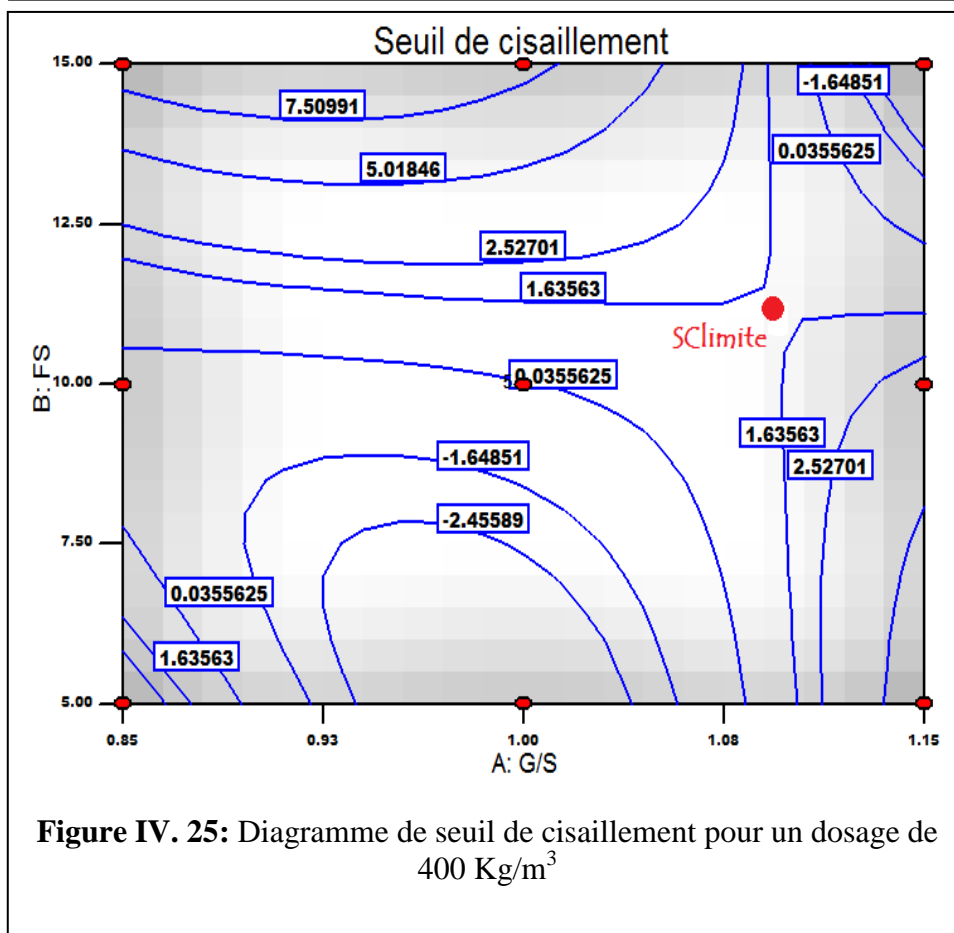


Figure IV. 25: Diagramme de seuil de cisaillement pour un dosage de 400 Kg/m³

Le modèle suggéré (cubique) a un coefficient de corrélation ($R^2 = 0.8444$) pour la ligne de tendance (Figure IV.22) qui a donné une bonne corrélation entre les résultats prévus et celle obtenu (Tableau IV.16).

Pour les BAP à dosage en ciment 350 Kg/m^3 le point de déviation (**SCLimite**) pour le quel le seuil de cisaillement des BAP ont changés d'allure est ($G/S = 0,97$) au dessous de ce dosage et pour des dosages en Fumé de silice allons jusque 13% le seuil de cisaillement est amélioré, par contre on peut étaler le taux de la fumé de silice même au-delà de 15% pour un rapport **G/S supérieur à 1,10**.

Pour les bétons à dosage 400 Kg/m^3 l'ensemble des BAP formulés ont un seuil de cisaillement minimale est largement inférieur à ceux formulé avec un dosage en ciment de 350 Kg/m^3 , les meilleurs seuils sont enregistrés dans l'espace limité par **10%** Fumé de silice et un rapport **G/S = 1,10**.

Tableau IV. 13: Ecart entre valeurs actuelles et valeurs prévues selon modèle de seuil de cisaillement.

N° d'essai	G/S	FS %	CIM Kg/m^3	Valeur actuelle	Valeur privue	Residuelle
1	1.15	5.00	350	0.091	4.20	-4.11
2	1.00	10.00	400	2.70	-3.49	6.19
3	0.85	5.00	350	4.82	6.89	-2.08
4	0.85	5.00	400	0.79	-0.32	1.11
5	1.00	15.00	400	0.091	-0.040	0.13
6	1.00	5.00	350	0.091	3.05	-2.96
7	1.15	15.00	400	11.76	8.75	3.01
8	1.00	10.00	400	0.091	8.13	-8.04
9	1.00	10.00	350	0.091	-4.95	5.04
10	0.85	10.00	350	0.49	-0.040	0.53
11	1.00	10.00	400	0.091	-0.040	0.13
12	1.00	10.00	350	0.49	-0.040	0.53
13	1.15	10.00	400	0.49	-0.040	0.53
14	0.85	15.00	400	17.71	13.30	4.41
15	1.15	15.00	350	6.21	13.00	-6.79
16	1.00	10.00	400	0.091	-2.29	2.38
17	0.85	15.00	350	0.091	1.80	-1.71
18	1.00	10.00	350	8.99	14.89	-5.90
19	1.00	5.00	400	0.091	-2.27	2.36
20	1.00	10.00	350	18.73	21.43	-2.71

21	0.85	10.00	400	46.50	39.06	7.44
22	1.00	15.00	350	6.40	11.14	-4.74
23	1.15	5.00	400	18.61	14.89	3.71
24	1.00	10.00	400	8.99	14.89	-5.90
25	1.00	10.00	350	18.61	14.89	3.71
26	1.15	10.00	350	18.61	14.89	3.71

IV.2.2 : viscosité :

Tableau IV. 14: Sommaire statistique des modèles pour la viscosité.

Source	R-Squared
Linear	0.131
Quadratic	0.3221
Cubic	0.8575 <u>Suggested</u>

EQUATION FINALE DU MODELE CUBIQUE (viscosité)

$$\gamma = +79.17 + 32.45 * G/S + 21.41 * FS + 6.57 * CIM - 6.16 * (G/S)^2 + 28.02 * (FS)^2 - 2.26 * G/S * FS + 2.91 * G/S * CIM + 7.66 * FS * CIM - 11.53 * (G/S)^2 * FS - 30.43 * (G/S)^2 * CIM - 42.66 * G/S * (FS)^2 + 30.84 * (FS)^2 * CIM - 16.47 * G/S * FS * CIM$$

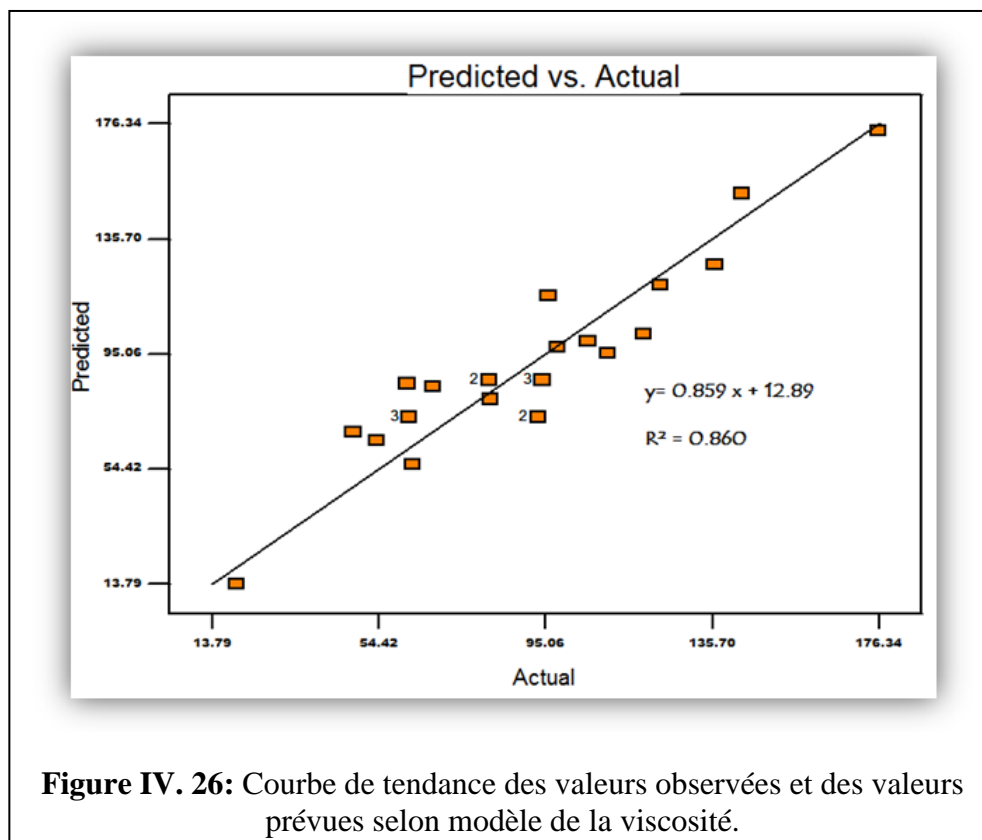
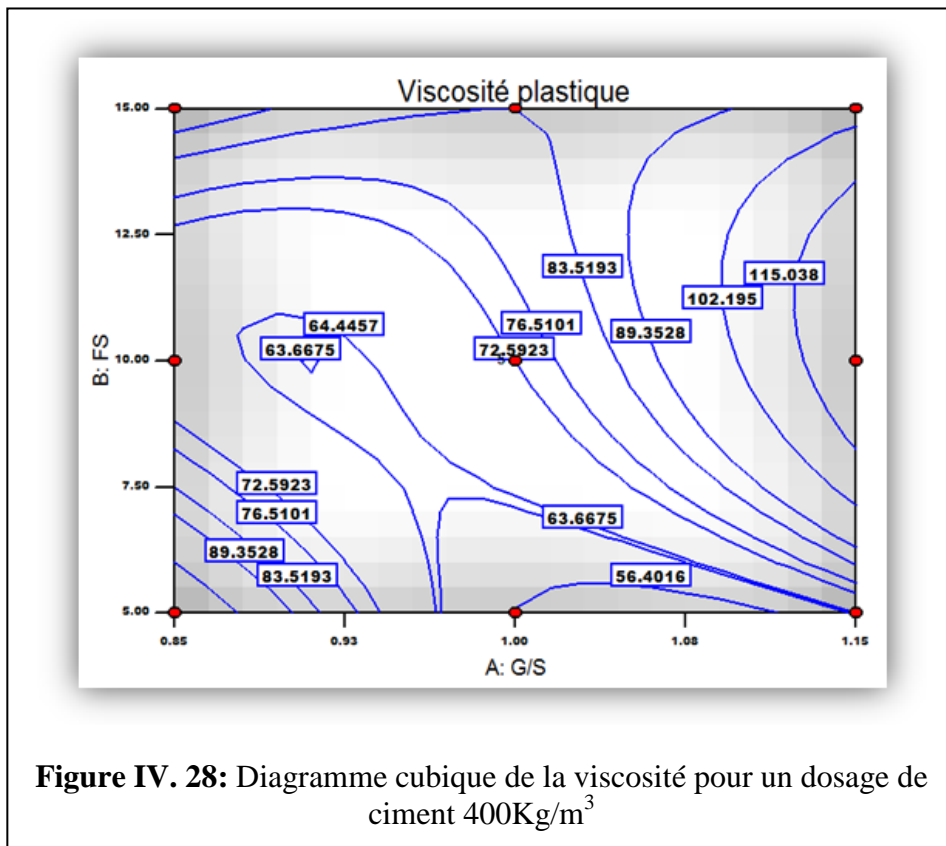
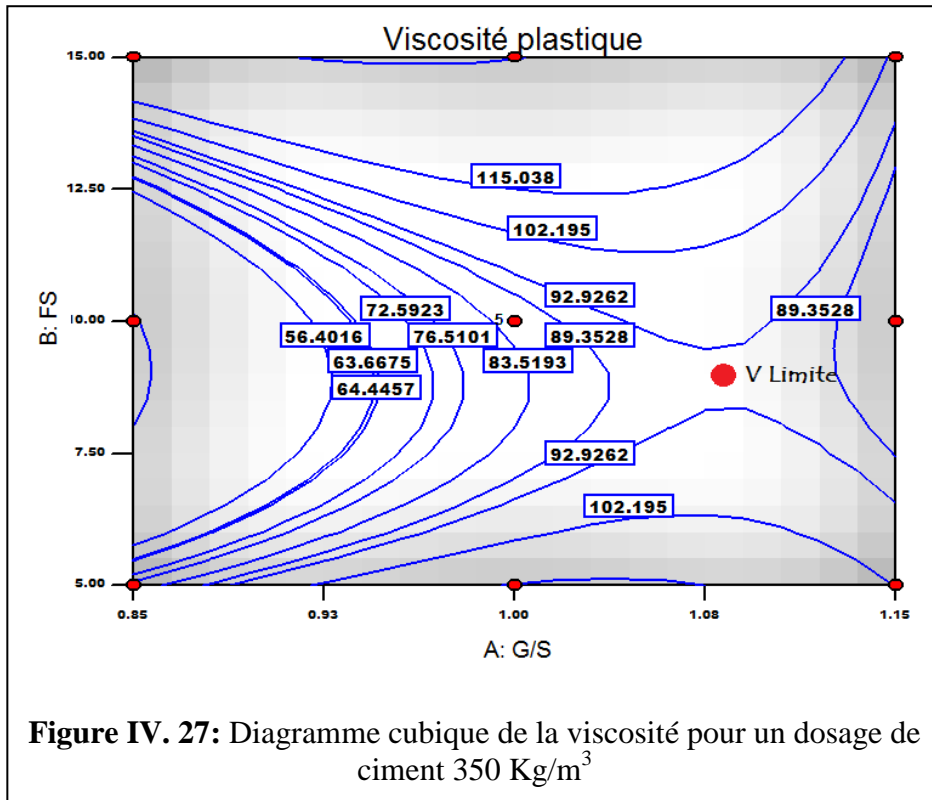


Figure IV. 26: Courbe de tendance des valeurs observées et des valeurs prévues selon modèle de la viscosité.



Bien que les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton peut ne pas être mis en place correctement, ses propriétés désirées ne seront pas obtenues. Comme toutes les caractéristiques du béton, ses paramètres rhéologiques dépendent fortement de sa composition et du rapport E/L (paramètre fixe dans notre étude) qui influe sur le seuil de cisaillement et sur la viscosité plastique, pour mieux caractériser le comportement du béton et son écoulement, de nombreux paramètres méritent d'être variables afin de constater leur influence vis-à-vis le comportement rhéologique des BAP. L'importance du taux des ultrafines dans la composition des BAP est magistral, c'est pour cela tous les paramètres variables choisis dans le cadre de notre action expérimentale et par la suite de modélisation semble très importantes et primordiales dans ce sens (G/S, dosage en Ciment et le taux de la Fumée de Silice).

(Roussel et al, 2010) ont schématisé l'impact de la fraction volumique sur le comportement rhéologique d'une pâte de ciment. Ils ont constaté nettement un impact très important de la fraction volumique (G/S). Il a été montré que le comportement rhéologique d'un béton dépend de la quantité d'agrégats : il existe un régime dominé par la friction entre les particules d'agrégats et un second régime dominé par les interactions hydrodynamiques (Yasmine et al, 2008).

La variation des paramètres rhéologiques et en particulier la viscosité, en fonction du taux de substitution des ultrafines à des dosages en ciments différents (**350 et 400Kg/m³**), sont représentées sur les figures IV.27 et IV 28.

On peut faire distinguer deux seuils avec un pouvoir fluidifiant remarquable au dessous du point (T_x) et deux autres intervalles au-dessus donnant à la texture un comportement moins fluide. Le taux important de la fumée de silice en combinaison à un taux minimale de G/S possèdent évidemment un pouvoir filler et créent un effet de roulement, entre les grains de ciment, qui les rendent plus mobiles. On remarque que les meilleurs résultats de viscosité pour un dosage en ciment **350 Kg/m³** sont enregistrés pour un rapport **G/S proche à 1** et un taux de fumée de silice maximal (**15%**). Par contre pour un dosage en ciment supérieur (**400Kg/m³**), le meilleur comportement rhéologique est attribué pour un taux de fumée de silice **supérieur à 12,50%** sur **tout l'intervalle du rapport G/S (entre 0,85 et 1,15)** et même à un taux de **FS= 10%** avec un rapport **G/S supérieur ou égal à 1**.

Tableau IV. 15: Ecart entre valeurs actuelles et valeurs prévues selon le modèle de viscosité.

N° d'essai	G/S	FS %	CIM Kg/m ³	Valeur actuelle	Valeur prévue	Residuelle
1	1.15	5.00	350	123.12	119.16	3.97
2	1.00	10.00	400	62.65	56.03	6.63
3	0.85	5.00	350	53.91	64.51	-10.59
4	0.85	5.00	400	48.18	67.33	-19.15
5	1.00	15.00	400	93.26	72.60	20.67
6	1.00	5.00	350	136.38	126.41	9.97
7	1.15	15.00	400	110.36	95.18	15.18
8	1.00	10.00	400	67.72	83.52	-15.81
9	1.00	10.00	350	97.99	97.36	0.62
10	0.85	10.00	350	61.88	72.60	-10.72
11	1.00	10.00	400	93.26	72.60	20.67
12	1.00	10.00	350	61.88	72.60	-10.72
13	1.15	10.00	400	61.88	72.60	-10.72
14	0.85	15.00	400	81.62	79.02	2.60
15	1.15	15.00	350	95.75	115.52	-19.76
16	1.00	10.00	400	119.06	101.90	17.16
17	0.85	15.00	350	19.80	13.79	6.01
18	1.00	10.00	350	81.28	85.74	-4.46
19	1.00	5.00	400	61.41	84.51	-23.10
20	1.00	10.00	350	142.96	151.58	-8.61
21	0.85	10.00	400	176.34	173.67	2.67
22	1.00	15.00	350	105.46	99.52	5.94
23	1.15	5.00	400	94.41	85.74	8.67
24	1.00	10.00	400	81.28	85.74	-4.46
25	1.00	10.00	350	94.41	85.74	8.67
26	1.15	10.00	350	94.41	85.74	8.67

IV.2.3 : Résistance à la compression à 28jours :

Tableau : Sommaire statistique des modèles de la résistance à la compression à 28jours

Source	R-Squared
Linear	<u>0.5773</u>
Quadratic	0.7020
Cubic	0.9128 <u>Suggested</u>

EQUATION FINALE DU MODELE CUBIQUE (Rc_{28jrs})

$$Rc_{28jrs} = +50.72 + 4.88 * G/S + 2.43 * FS - 5.65 * CIM - 1.88 * (G/S)^2 + 2.14 * (FS)^2 - 2.82 * G/S * FS + 1.17 * G/S * CIM + 0.061 * FS * CIM - 3.63 * (G/S)^2 * FS + 0.84 * (G/S)^2 * CIM - 2.28 * G/S * (FS)^2 + 3.06 * (FS)^2 * CIM - 2.82 * G/S * FS * CIM$$

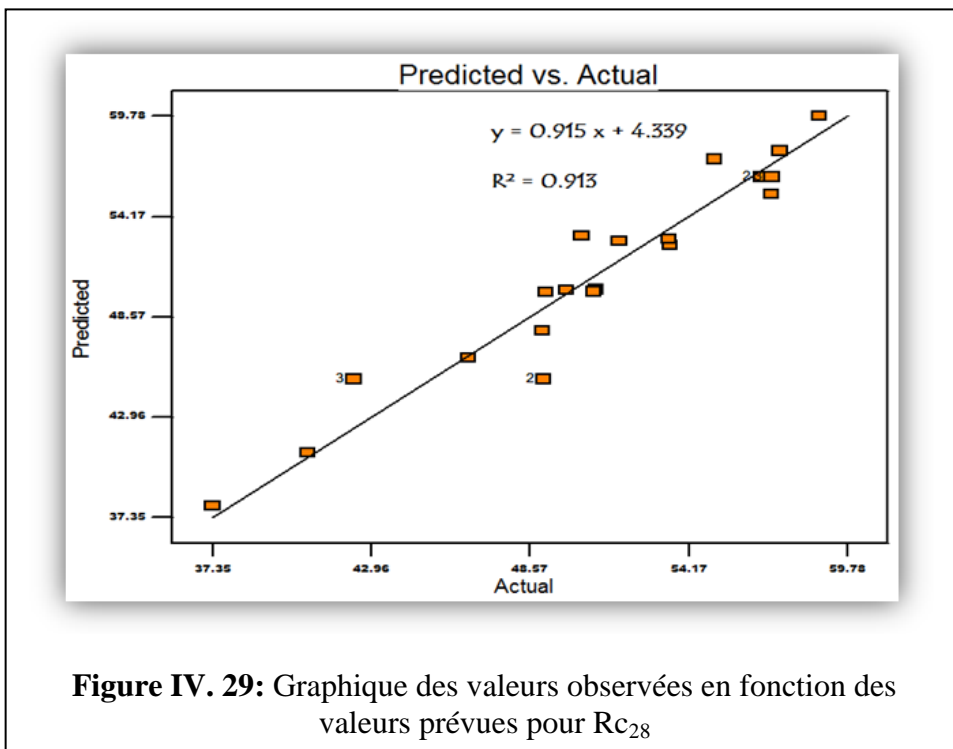


Figure IV. 29: Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Rc₂₈

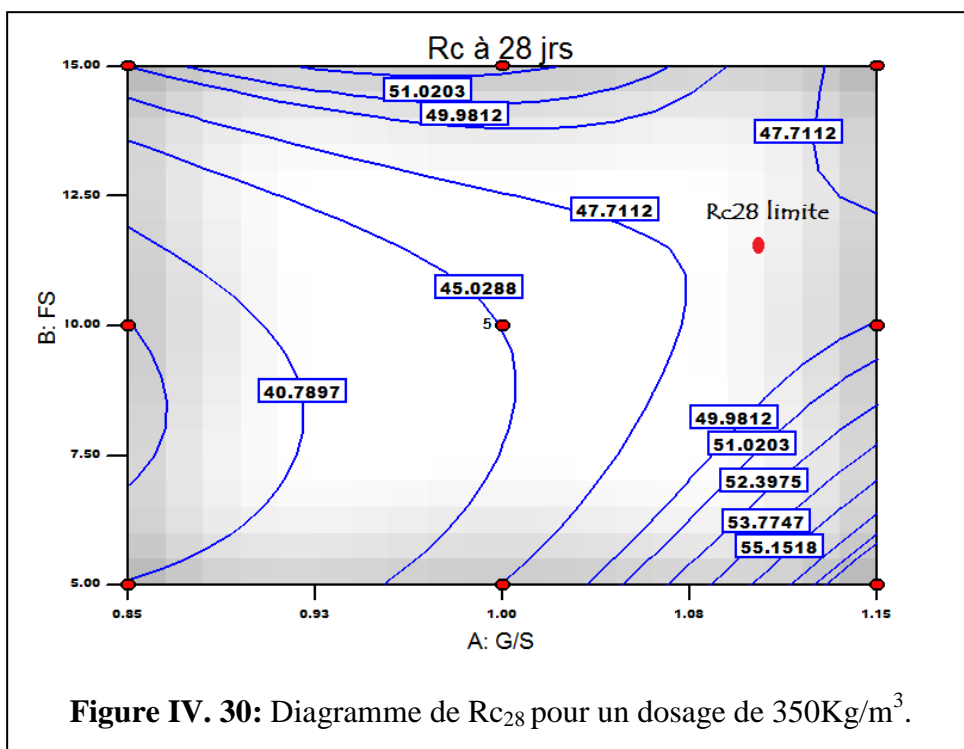
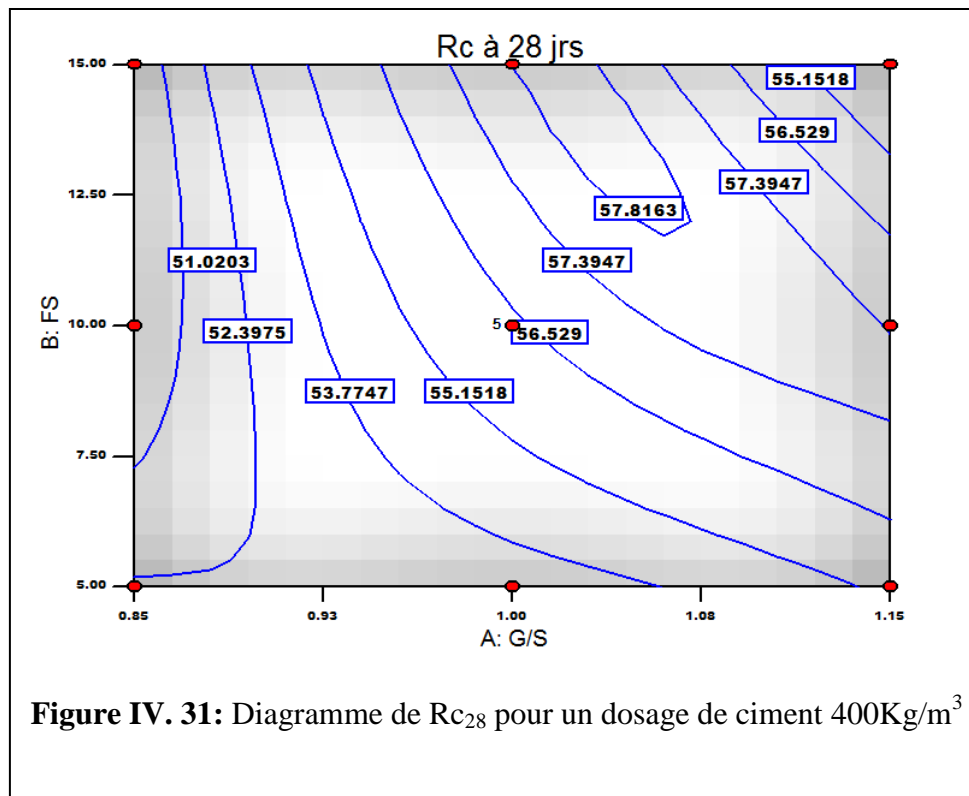


Figure IV. 30: Diagramme de Rc₂₈ pour un dosage de 350Kg/m³.



Comme il est connu, les performances mécaniques sont fortement influencées par le comportement rhéologique des matériaux cimentaires, il s'avère que si un béton ne peut pas être mis en place correctement, ses propriétés physico-mécaniques désirées ne seront pas obtenues. Comme toutes les caractéristiques du béton, ses paramètres rhéologiques ainsi mécaniques dépendent fortement de sa composition (dosage en ciment, en granulats, présence des adjuvants, taux des ultrafines et le rapport E/L).

Les performances mécaniques des BAP formulés à base des paramètres fixe (E/L et % d'adjuvant) et d'autres variables (G/S, dosage en ciment et %FS) sont comparées, selon le principe de l'équivalence de performances,

Après modélisation des résultats de réponses mécanique à 28jour par le modèle quadratique recommandé par le logiciel Design-Expert avecun coefficient de corrélation ($R^2 = 0.9128$) pour la ligne de tandance (Figure IV.29) qui a donné une bonne corrélation entre les résultats prévus et celle obtenu (Tableau IV.18). Les figures IV.30 et IV.31 Explique la variation de la résistance mécanique à la compression à l'âge de 28 jours des bétons autoplaçant avec des différents dosages en ciment (**350 et 400Kg/m³**), les réponses mécanique obtenue sont en totalité très encourageante pour un BAP (**entre 40 et 50MPa**), avec un taux minimal en **fumé de silice (5%)** et un rapport **G/S supérieur (0,85)**, on peut avoir des réponses mécaniques dans le périmètre de 40 MPa, les meilleures résistance pour un dosage de **350Kg/m³** peuvent

être obtenue pour un rapport **G/S supérieur ou égale à 1,05** avec un taux de **fumé de silice proche à 10%**, par contre pour un dosage en ciment plus élevé (**400Kg/m³**) la totalité des résistances mécaniques sont supérieures à **50 MPa**, avec un taux minimal en **fumé de silice (5%)** et un rapport **G/S supérieur (0,85)**, on peut avoir des réponses mécanique dans le périmètre de **52 MPa**, néanmoins les meilleurs réponses mécanique peuvent être atteint avec un rapport **G/S entre 1 et 1,10** et un taux de fumé de silice **supérieur à 10% (Rc proche 60MPa)**.

Tableau IV. 16: Ecart entre valeurs actuelles et valeurs prévues selon modèle de la résistance à la compression à 28 jrs.

N° d'essai	G/S	FS %	CIM Kg/m ³	Valeur actuelle	Valeur prévue	Residuelle
1	1.15	5.00	350	53.52	52.55	0.97
2	1.00	10.00	400	50.41	53.07	-2.66
3	0.85	5.00	350	57.12	55.43	1.69
4	0.85	5.00	400	49.12	49.93	-0.81
5	1.00	15.00	400	56.74	56.37	0.37
6	1.00	5.00	350	55.11	57.37	-2.26
7	1.15	15.00	400	49.87	50.03	-0.16
8	1.00	10.00	400	57.42	57.82	-0.40
9	1.00	10.00	350	53.48	52.92	0.56
10	0.85	10.00	350	57.14	56.37	0.77
11	1.00	10.00	400	56.74	56.37	0.37
12	1.00	10.00	350	57.14	56.37	0.77
13	1.15	10.00	400	57.14	56.37	0.77
14	0.85	15.00	400	40.71	40.96	-0.25
15	1.15	15.00	350	49.00	47.78	1.22
16	1.00	10.00	400	58.81	59.78	-0.97
17	0.85	15.00	350	37.35	37.98	-0.63
18	1.00	10.00	350	49.06	45.07	3.99
19	1.00	5.00	400	50.90	50.09	0.81
20	1.00	10.00	350	50.84	49.96	0.88
21	0.85	10.00	400	51.73	52.77	-1.04
22	1.00	15.00	350	46.40	46.24	0.16
23	1.15	5.00	400	42.35	45.07	-2.72
24	1.00	10.00	400	49.06	45.07	3.99
25	1.00	10.00	350	42.35	45.07	-2.72
26	1.15	10.00	350	42.35	45.07	-2.72



Conclusion général :

Cette étude nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la technologie des bétons autoplçant à l'état frais et durci, nous à permis de comprendre la formulation, ainsi que l'influence des matériaux utilisés sur les propriétés rhéologiques.

Les résultats de ce travail peuvent mener aux conclusions suivantes :

- Le dosage en ciment 250 kg/m^3 pour les bétons autoplçant ne valide pas les essais de caractérisation pour cela il faut l'éviter.
- L'introduction des ajouts actifs dans la composition granulométrique des sables assure une bonne homogénéité. Cet effet se traduit par une réduction sensible de frottement ce qui permet à un bon écoulement et meilleure ouvrabilité par la suite.
- L'ajout de la poudre de verre n'affecte pas la viscosité plastique, mais diminue significativement le seuil de cisaillement.
- Grace à sa surface spécifique et sa grande finesse, la fumée de silice permet d'obtenir des bétons plus denses avec une porosité très fine, plus imperméables et donc plus durables.
- Les bétons autoplçants sont caractérisés par les plus faibles seuils de cisaillement, ce qui provoque une bonne déformabilité du béton; mais avec des viscosités similaires ou légèrement supérieures par rapport à celles des bétons ordinaires afin d'assurer une bonne stabilité au mélange.
- La vitesse du développement des réponses mécaniques est plus élevée au jeune âge pour les bétons témoin, par contre dans le cas des BAP à base de sable préparé (BPZ et BLHF) élevée à long terme.
- En générale, l'effet des ajouts vis-à-vis de la résistance mécanique est positif vue leurs réactivité chimique qui influe sur le degré d'hydratation, la compacité est par conséquence sur la réponse mécanique.

- Les résistances aux jeunes âges diminuent avec le taux d'incorporation de la PV.

En conclusion finale de ce travail, nous pouvons dire que l'approche des plans d'expériences est une méthode efficace et simple qui offre une meilleure analyse et une bonne interprétation par le moyen de modélisation et d'optimisation dans le cas où on confronte une étude expérimentale à plusieurs facteurs estimés influent la réponse étudiée, là où l'analyse classique demeure complexe à cause des interactions de plusieurs facteurs coûteux et longs, vu la nécessité d'un nombre d'essais très important, et par conséquent la formulation des BAP par la méthode des plans d'expérience est fortement possible à savoir les objectifs visés.

Perspectives et recommandations :

- Etude de l'influence de la température sur les propriétés d'un béton autoplaçant.
- Refaire les mêmes études augmentant le rapport E/L supérieur à 0.40.
- Etude microstructurale des matrices cimentaires à base de ces ajouts DRX, MEB.
- Etude de la durabilité des bétons autoplaçants vis-à-vis les attaques d'acide.

Références bibliographiques:

Abdalla, A. H. Optimisation et Performance des Betons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland. ProQuest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada). (2012).

Assaad, J, Khayat, K. H. et Daczko, J. Evaluation of Static Stability of SelfConsolidating Concrete, 101(3), 207-215. 2004.

Assié S, « DURABILITE DES BETONS AUTOPLAÇANT », thèse de Doctorat INSAUPS de Toulouse, N° d'ordre : 747, soutenue le 29 Octobre 2004.

Baron J et Ollivier J. la durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1992.

Belghit, CH. 2009. "CONTRIBUTION A LA FORMULATION D ' UN BETON Effet Du Laitier Granulé Micronisé Sur l ' Ouvrabilité Option :"

Benaïcha, Houhcine. 2013. "Formulation Des Différents Bétons (BAP , BHP et BFUP) à Haute Teneur En Additions Minérales: Optimisation Pour Améliorer Le Coulage, La Résistance Au Jeune Age et La Durabilité Des Bétons."

Billberg P, « Self-compacting concrete for civil engineering structure – the Swedish experience », Report 2 :99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockolm, 80p, 1999.

Bouakkaz M A. mémoire magister en génie civil « caractérisation du béton par les méthodes non destructives – application de la méthode de fréquence de résonance» universiteaboubekrbelkaid – tlemcen , le 28/06/2012.

Chekireb, Sihem. 2015. "Valorisation de La Poudre de Verre Dans Le Béton Autoplaçant."

Chen, J. J. et Kwan, a. K. H. (2012). Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste. Cement and Concrete Composites, 34(1), 1-10.

Chong, HU. 1995. "Rheologie Des Bétons Fluides."

Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006

Coussot P, and Ancy C. "Rheophysics of pastes and suspensions." EDP Sciences, Paris, 300p. 1999.

Coussot, P. Comprendre la rhéologie: de la circulation du sang à la prise du béton. EDP Sciences. (2012).

Cyr, M, Legrand, C. et Mouret, M. (2000). Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. Cement and Concrete Research, 30(9), 1477-1483.

De Larrard F : Structures granulaires et formulation des bétons - Ouvrage original : «Concrete Mixture Proportioning– A scientific Approach» , Modern Concrete Technology Series N° 9, Londres, Traduit par : André Lecomte, p 414, 1999.

De Larrard F, Sedran T, "Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 32, 11, pp. 1699-1704, 2002.

DELAGRAVE A, Etude des mécanismes de pénétration des ions chlore dans les bétons conventionnels et à haute performance, Thèse de doctorat, spécialité Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada, 1996.

Domone, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. Cement and Concrete Composites, 28(2), 197-208. 2006.

El Barrak M, Mouret M, Bascoul A.: "Écoulement des suspensions CimentAdditifs participant au Béton Autoplaçant (BAP) : Niveaux d'influence des constituants", Rencontres Universitaires de Génie Civil - Ville et Génie Civil, AUGC, Marne la Vallée. 2004.

Ferraris, C. F, Obla, K. H. et Hill, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. Cement and Concrete Research, 31(2), 245-255.

Festa Jean et Dreux Georges. 2007. Nouveau Guide Du Béton et de Ses Constituants. Pdf. EYROLLES.

Feys, D, Verhoeven, R. et De Schutter, G. (2009). Why is fresh self-compacting concrete shear thickening? *Cement and Concrete Research*, 39(6), 510-523.

G. Frédéric, modélisation et optimisation par plan d'expérience d'un moteur à commutation électronique. Thèse de doctorat de l'université des sciences et technologie de Lille, janvier 1995.

Ghezal, A. (1999). Modélisation statistique du comportement des bétons autoplaçants & optimisation. Université de Sherbrooke

GOUPY Jacques «Introduction aux Plans d'expériences». Dunod. Paris. 303 pages. (2001).

Goupy, Jacques. 2013. "Introduction Aux Plans D'Expériences." Introduction aux plans d'expériences: 12–14.

Hamouine, A., « fabrication du béton autoplaçant à base des matériaux locaux de la région Saoura », thèse doctorat de centre l'université de Bachar, 2000.

Hanaa Fares. Thèse de doctorat en Génie Civil «Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée», Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009.

Hidalgo, J, Chen, C. et Struble, L. J. (2009). Correlation between Paste and Concrete Flow Behavior, (105), 281-288. (2001).

Houben H, G. H. (2006). traité de construction en terre, CRA Terre, éditions parenthèses. (France, Ed.) (Edition Pa).

Husson. S., « Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers ». Application aux mortiers, thèse de Doctorat, Université Saint-Etienne, 1991.

Hwang, S, Khayat, K. H. et Bonneau, O. Performance-Based Specifications of Self-Consolidating Concrete Used in Structural Applications, 103(2), 121-129. 2006.

Idir, R. Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcalisilice et la réaction pouzzolanique. Université de Sherbrooke. (2009).

Idir, R., Cyr, M. et Tagnit-Hamou, A. Pozzolanic properties of fine and coarse color mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 19-29. (2011).

J. Baron et J. Ollivier, les bétons bases et données pour leurs formulations, EYROLLES, 1999.

Jain, J. a. et Neithalath, N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 148-156. (2010).

Kaddour B A & Benchenna. 2017. “Valorisation Des Tufs Pour La Fabrication Des Briques En Terre Comprimées.” MoulayTaharsaida.

Khayat, K. H. Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, 96(3), 346-354. 1999.

Kim, B, Jiang, S., Jolicoeur, C. et Aõ, P. The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste, 30, 887-893. 2000.

Koehler Eric P., Fowler David W. (2004): Development of a portable rheometers for fresh portland cement concrete. International Center for Aggregates Research. The university of Texas at Austin. ICAR report 105-35, Measuring the workability of high fines concrete, 306 pages.

Laifa Walid, « contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons autoplaçants », thèse doctorat, université Badji Mokhtar à Annaba, 2015.

Lapasin, R. (1979). Thixotropic behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 9(c), 309-318

Lapasin, R. (1979). Thixotropic behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 9(c), 309-318

M. Pillet, Introduction aux plans d'expérience par la méthode Taguchi. Editions d'organisation université ,1992

Macleod. F. « l'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposé aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage », Cement association of Canada, ing. Mars 2005.

Manai.K, « Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants », Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.

Merdia A, Talah A, Kharchi F. et Chaid R, "Contribution à l'étude de la corrosion des BHP de pouzzolane en milieu sulfaté", Colloque International CMEDIMAT2005, Oran, Algérie, les 06 et 07 Décembre 2005.

Merniz Mohamed, « étude de l'influence de la nature et les dimensions des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants (BAP) », mémoire master, université Mohamed Boudiaf à M'sila, 2015.

Nasri, Said. 2016. "Caractérisation Aux Moyens Des Essais Non- Destructifs (NDT) et Essai Direct d'un Béton Auto Plaçant(BAP) a Base de Matériaux Locaux (Effet de La Nature Du Sable)."

Okamura, H. et Ouchi, M. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5-15. 2003.

Ozawa K, Tangtermsirikul S., Maekawa K., "Role of powder materials on filling capacity of freshconcrete", Proceedings of the 4th CANMET/A I Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concr , Istanbul, Turquie, pp. 121-137, 1992.

Papo, A. (1988). Rheological models for cement pastes. Materials and Structures, 21(1), 41-46.

Papo, A. et Piani, L. (2004). Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. Cement and Concrete Research, 34(11), 2097-2101.

Park, C. K., Noh, M. H. et Park, T. H. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. Cement and Concrete Research, 35(5), 842-849.

Perrot, a, Lecompte, T., Khelifi, H., Brumaud, C., Hot, J. et Roussel, N. (2012). Yield stress and bleeding of fresh cement pastes. Cement and Concrete Research, 42(7), 937-9440.

Projet National BAP, Impacts socio-économiques, rapport de synthèse du groupe D, 39 pages

RILEM, "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILE Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso , RILEM Publications, France, 2001.

Sant, G, Ferraris, C. F. et Weiss, J. (2008). Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development. *Cement and Concrete Research*, 38(11), 1286-1296

Scholze H, *Le verre, nature, structure et propriétés*, institut du verre, Paris 1980.

Schwartzentruber, L. D, Le Roy, R. et Cordin, J. (2006). Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1203-1213

Schwarz, N, Cam, H. et Neithalath, N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496. (2008).

Sedran T, « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mars 1999.

Shao, Y, Lefort, T. Moras, S. et Rodriguez, D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91-100. (2000).

Shaughnessy, R. et Clark, P. E. The rheological behavior of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 18(3), 327-341. (1988).

Shayan, A. et Xu, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457-468. (2006).

Shayan, A. et Xu, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81-89. (2004).

Sheinn, A.M.M, “ Rheological modelling of self-compacting concrete ”, Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007

Shi, C. et Wu, Y. Mixture Proportioning and Properties of Self-Consolidating Lightweight Concrete Containing Glass Powder. *ACI Materials Journal*, (102). (2005).

Shi, C. et Wu, Y. Mixture Proportioning and Properties of Self-Consolidating Lightweight Concrete Containing Glass Powder. *ACI Materials Journal*, (102). (2005).

SHI, C. WU, Y et RIEFLERB, C et WANG, B characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, cement and concrete research, 2005.

Taha, B. etNounu, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713-720. (2008a).

Taha, B. etNounu, G. Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 497-505. (2008b).

Taleb, Omar. 2017. "Etude Du Comportement Rheologique Des BetonsAutoplaçants Locaux."

Tangtermsirikul S, Van B.K, "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete",*Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering*, Bangkok, pp. 58-69, 1995.

Uchikawa, H, Sawaki, D. etHanehara, S. (1995). Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 353-364.

Van B.K, "A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete", MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994.

Venuat. M, *La pratique des ciments, mortiers et bétons*, Tome 1, « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers », édition 2, Collection Moniteur – 277p – 1989.

Vikan, H, Justnes, H., Winnefeld, F. etFigi, R. (2007). Correlating cement characteristics with rheology of paste. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1502-1511.

Wallevik, O. H. *Rheology of Cementitious Materials*. The Icelandic Building Research Institute.(2006).

Wong, H. H. C. et Kwan, a. K. H. (2008). Rheology of Cement Paste: Role of Excess Water to Solid Surface Area Ratio. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 189-197.

Yagoub.M, « matériaux de construction (chapitre 2) », cours en génie civil, université Mohamed Khaider à Biskra, 2009.

Yahia, A, Tanimura, M. et Shimoyama, Y. (2005). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 532-539.

Zidol, A. Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke. (2009).

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5



Algérie Cement Company (SPA)

Hamam, Dassa, Mile (ACC)
Tel: +213 35 50 78 23
Fax: +213 35 55 70 30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel: +213 (0) 21 48 16 65
Fax: +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Ogdar (CBA)
BP 67, 29200, Mascara
Tel./ Fax: +213 (0) 40 64 88 36

LAFARGE
لأفارج

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3), ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement, .etc.) ;
- Secteur industriel.



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam - Dacia, Mile (AOC)
Tel : +213 35 50 76 25
Fax : +213 35 56 70 30

Direction générale

33, Rue des Pères, Hydra, Alger
Tel : +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Unité Oggar (OBA)
BP 67, 29200, Mascara
Tel. / Fax : +213 (0) 46 04 86 98

LAFARGE
لافارج

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

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

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

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

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

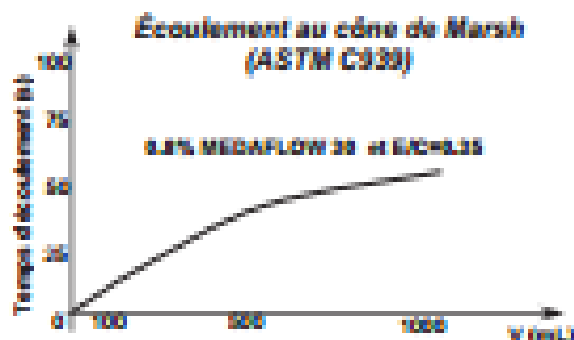
DOMAINES D'APPLICATION

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

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :
Sur béton frais :

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



Sur béton durci :

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

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1,4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

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

MODE D'EMPLOI

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

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

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

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



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

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

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



MEDAFLOW 30

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitinaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

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



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

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

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

