

**République algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi-BBA    جامعة محمد البشير الابراهيمي برج بوعريريج  
Faculté des sciences et de la technologie    كلية العلوم و التكنولوجيا  
Département génie civil    قسم الهندسة المدنية



# Mémoire de fin d'étude

REALISE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

FILIERE : GENIE CIVIL

SPECIALITE : MATERIAUX

## *Thème*

**CARACTERISATION D'UN BETON  
AUTOPLAÇANT PAR MODELISATION**

*Présenté par :*

**MAZA Nabil**

**REDJOUH Houssam Eddine**

*Encadré par :*

**TABET Souad**

**TEBBAI Nadia**

**Examiné par le jury :**

**MCA Université de BBA**

**MCA Université de BBA**

**LOUMACHI Lazhar    MAA Université de BBA**

*Président*

*Examineur*

*Examineur*

**Année Universitaire : 2019/2020**

---

# Remerciements

*Nous tenons à remercier tout d'abord le dieu tout puissant, le très miséricordieux de nous avoir accordé la grâce de réaliser ce travail.*

*Nous réservons le meilleur remerciement à nos parents, qui nous ont beaucoup aidés.*

*Nous voudrions aussi que notre promotrice Mme TABET SOUAD trouve ici nos meilleures salutations et notre reconnaissance pour ses soutiens, ses conseils et ses remarques importantes qui nous ont permis l'achèvement de ce travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements au Dr. KESSAL*

*OUSSAMA pour son aide précieuse et à tous nos amis qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de notre étude à*

*L'université*

---

# Dédicaces

*J'ai le grand honneur de dédier ce travail*

*A mes parents,*

*A mes frères et sœurs*

*A tous mes amis*

*Et à tous ceux que j'aime*

**NABIL MAZA**

*J'ai le grand honneur de dédier ce travail*

*A mes parents,*

*A mon très cher frère*

*A tous mes amis*

*Et à tous ceux que j'aime*

**REDJOUH HOUSSAM**

---

# Résumé

---

Cette étude s'est déroulées dans des circonstances spéciales (crise sanitaire liée au **COVID-19**) d'où nous avons fait un changement des objectifs prévus appuyer sur nos résultats expérimentaux, que nous n'avons pas pu les faire.

La présente étude est basée sur des résultats d'une étude précédente, traitée par Meguedem et Touabet [1], à travers laquelle elles ont étudié les propriétés mécaniques et rhéologiques de différentes formulations concernant les bétons autoplaçant où des différents pourcentages de poudre de céramique ont été utilisés comme addition minérale en première étape, où le volume de la pâte de ciment augmente et par conséquent le volume des granulats diminue, et en faisant varier pour chaque mélange de BAP ainsi formulé, le pourcentage du sable fin en deuxième étape de recherche, et ceci dans le but d'obtenir des propriétés de haute qualité.

Dans la suite de leur étude, nous avons exploité leurs résultats pour en faire une modélisation par plan d'expériences (JPM) afin d'analyser l'influence des différentes réponses à l'état frais ou durcis en fonction des pourcentages de poudre de céramique et les pourcentages du sable à partir d'un modèle mathématique.

***Mots clés :** Béton auto plaçant, plan d'expériences, rhéologie, viscosité, additions minérales.*

**ملخص :**

تمت هذه الدراسة في ظل ظروف خاصة (أزمة كوفيد 19 الصحية) حيث قمنا بإجراء تغيير في الأهداف المخطط لها بناءً على نتائجنا التجريبية المزمع إجراؤها، وهو ما لم نتتمكن من القيام به.

تستند هذه الدراسة إلى نتائج دراسة سابقة، قامت بها كل من الطالبتين مقدم وثوابت والتي من خلالها درستنا الخصائص الميكانيكية والريولوجية للتركيبات المختلفة المتعلقة بالخرسانة ذاتية الضغط حيث تم استخدام نسب مختلفة من مسحوق السيراميك. تستخدم كإضافة معدنية في المرحلة الأولى، حيث يزداد حجم عجينة الأسمنت وبالتالي ينخفض حجم الركام، وبتفاوت نسبة الرمل الناعم في مرحلة البحث الثانية باختلاف كل خليط من الخرسانة ذاتية الضغط وهذا من أجل الحصول على خصائص عالية الجودة وكنتمه لدراستهما، استخدمنا نتائجهما لعمل نموذج (JPM) عن طريق تصميم التجارب من أجل تحليل تأثير الاستجابات المختلفة في الحالة الرخوة أو الصلبة وفقاً لنسب مسحوق السيراميك. والنسب المئوية للرمل الناعم عن طريق تصميم نموذج رياضي.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة ذاتية الضغط، تصميم تجريبي، ريولوجيا، لزوجة، إضافات معدنية

**Abstract:**

This study took place under special circumstances (COVID-19 health crisis) where we made a change in the planned targets based on our experimental results, which we were unable to do.

The present study is based on the results of a previous study, treated by Meguedem and Touabet [1], through which they studied the mechanical and rheological properties of different formulations concerning self-compacting concretes where different percentages of ceramic powder were used as a mineral addition in the first stage, where the volume of the cement paste increases and consequently the volume of the aggregates decreases, and by varying for each mixture of BAP thus formulated, the percentage of fine sand in the second research stage, and this in order to obtain high quality properties.

In the rest of their study, we used their results to make a modeling by design of experiments (JPM) in order to analyze the influence of the different responses in the fresh or hardened state as a function of the percentages of ceramic powder. and the percentages of sand from a mathematical model.

**Keywords:** *Self-compacting concrete, experimental design, rheology, viscosity, mineral additions.*

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : REVUE GENERALE SUR LES BAP</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition du béton auto plaçant.....	3
I.3. Historique des bétons auto plaçant.....	4
I.4. Domaine d'utilisation des BAP.....	5
I.5. Les avantages et les inconvénients des BAP.....	5
I.6. Composition spécifique des BAP.....	6
I.7. Les constituants du BAP.....	7
I.7.1 Le ciment.....	8
I.7.2 Les différents types de ciment.....	9
I.7.3 Les additions minérales.....	9
I.7.4 Les granulats.....	10
I.7.5 L'eau.....	11
I.7.6 Le super plastifiant.....	11
I.7.7 Les adjuvants.....	13
I.8. Les fillers calcaires.....	13
I.8.1 Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP.....	13
I.9. Les différentes approches de formulation.....	13
I.9.1 Méthode de formulation pratique des BAP.....	14
I.9.2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie.....	14
I.9.2.1 Approche japonaise.....	14
I.9.2.2 Approche CBI (suédoise).....	15
I.9.2.3 Approche LCPC.....	15
I.10 Caractérisation d'un béton auto plaçant.....	16
I.10.1 Propriétés des BAP à l'état frais.....	16
I.10.2 Le remplissage.....	16
I.10.3 La résistance à la ségrégation.....	16
I.10.4 La capacité de passage.....	17
I.11. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	18
I.11.1 Essai de l'étalement (Essai au cône d'Abrams).....	19
I.11.2 Ségrégation dynamique (Essai de la boîte en L).....	19

I.11.3 Essais de ségrégation statique (Essai de la stabilité au tamis).....	20
I.11.4 Ressuage.....	21
I.12 Caractérisation d'un béton auto plaçant à l'état durci.....	22
A) Essais destructifs du béton.....	22
I.12.1 Les essais de compression.....	22
I.12.2 Les essais de traction par flexion.....	22
B) Essais non destructifs du béton.....	23
I.13 Conclusion.....	24

## CHAPITRE II : RHEOMETRIE ET PLANS D'EXPERIENCES

### PARTIE 01 : RHEOMETRIE

II.1 Introduction.....	25
II.1.2. Définition de la rhéologie.....	26
II.1.3. Rhéologie des BAP.....	26
II.1.4. Les rhéomètres.....	26
II.1.5. Appareils de mesures de rhéologie.....	27
II.1.5.1. Rhéomètres agitateurs-malaxeurs (Two-point-test, IBB).....	27
II.1.5.3 Rhéomètre plan-plan (BT Rhéom).....	29
II.1.5.4 Rhéomètre ICAR.....	29
II.1.6. Comportements rhéologiques.....	30
II.1.7.1. Ouvrabilité.....	31
II.1.7.2. Dilatance.....	31
II.1.7.3. Rhéologie.....	31
II.1.7.4. Contrainte de cisaillement $\tau$ .....	32
II.1.7.5. Seuil de cisaillement $\tau_0$ .....	33
II.1.7.6. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ .....	33
II.1.7.7. Viscosité.....	34
II.1.7.7.1. Viscosité dynamique $\mu$ .....	35
II.1.7.7.2. Viscosité cinématique $\nu$ .....	35
II.1.7.8. Fluide newtonien.....	36
II.1.7.9. La thixotropie et anti thixotropie.....	36
II.1.7.9.1 : Thixotropie.....	36
II.1.7.9.2. L'Anti thixotropie.....	37

II.1.8. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.....	37
II.1.9. Évaluation expérimentale de la rhéologie des bétons.....	38
II.1.10. Évaluation de la rhéologie pendant le malaxage et le transport.....	39
II.1.11. Perspectives en rhéologie des bétons.....	40
<b>PARTIE 02 : LES PLANS D'EXPERIENCES</b>	
II.2.1. Introduction.....	41
II.2.2. Définition.....	41
II.2.3. Démarche méthodologique.....	42
II.2.4. Intérêts des plans d'expériences.....	42
II.2.5. Conditions d'application des plans d'expériences.....	44
II.2.6.1. Notion d'espace expérimental.....	44
II.2.6.2. Notion de surface de réponse.....	47
II.2.7. Notion de modélisation mathématique.....	48
II.2.8. Le modèle de l'expérimentateur.....	48
II.2.9. Méthodologie des plans d'expériences.....	49
II.2.9.1. La recherche des facteurs influents.....	49
II.2.9.2. La modélisation.....	49
II.2.9.3. L'optimisation.....	49
II.2.10. Différents types de plans d'expériences.....	49
II.2.10.1. Plans factoriels complets à deux niveaux.....	50
II.2.10.2. Plans fractionnaires à deux niveaux.....	50
II.2.10.3.2. Différents types de mélanges.....	52
II.2.11. Outils de calcul.....	52
II.2.12. Présentation de logiciel « Design-Expert ».....	52
II.8 Conclusion.....	53

### **CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

III.1 Introduction.....	54
III.1 Les matériaux utilisés.....	54
III.2 Caractéristiques du sable utilisé.....	54
III.2.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650].....	54
III.2.1.1. Module de finesse :[NF EN P 18-304].....	56
III.2.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé.....	56

III.2.2.1 Masse spécifique (absolue) : [NF EN P 18-555].....	56
III.2.2.2 Masse volumique apparente [NF EN P 18-555].....	57
III.2.2.3 Porosité et compacité et indice des vides [NF EN P- 554].....	57
III.2.2.4 Equivalent de sable [NF EN 18-598].....	58
III.2.3 Caractéristique chimique du sable.....	60
III.3 Caractéristique du gravier utilisé.....	60
III.3.1 Origine du gravier utilisé.....	60
III.3.3 Les caractéristiques physiques des graviers utilisés.....	61
III.3.3.1 Masse volumique apparente : [NF EN P18-554].....	61
III.3.3.2 Masse volumique absolue.....	62
III.3.3.3 Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF EN P 18-554].....	62
III.3.4 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.....	63
III.3.4.1 Essai Los Angeles [NF EN P18-573].....	63
III.5 Ciment.....	65
III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5.....	65
III.5.1.2 Caractéristiques physiques du ciment utilisé EN 196-1, (2002).....	65
III.5.1.3 Caractérisation chimique et minéralogiques du ciment utilisé (CEM II/B 42.5)	
Tableau III.18 Les compositions chimiques du CEM II/B 42.5.....	66
III.6. Le Filler calcaire.....	66
III.6.1 Caractéristiques physiques et chimiques du calcaire : issues à partir des essais au laboratoire de la cimenterie d'Ain Lkbira à Sétif.....	66
III.6. Poudre de céramique blanche.....	67
III.6.1 Caractéristique physique et chimique de la céramique.....	67
III.8 Les Adjuvants.....	68
III.8.1 Description.....	68
III.8.2 Propriétés.....	68
III.9. L'eau de gâchage : [EN 1008].....	69
III.10. Formulation de béton auto plaçant par la méthode LCPC.....	69
III.10.1Méthode française (LCPC).....	69
III.11. Calcul des constituants d'un BAP.....	70
III.12 Procédure de fabrication des éprouvettes.....	73
III.13 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais.....	74
III.13.1 Essai au mini-cône (NF EN 1961).....	74
III.13.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8].....	75

---

III.13.3 Essai de la boîte en « L » : [NF EN 12 350-10].....	76
III.13.4 Essai de stabilité au tamis : [NF EN 12 350-11].....	76
III.13.5 Essais de rhéomètre I CAR (mesure seuil de cisaillement et viscosité).....	78
III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci.....	78
III.14.1 Essai compression [EN 206-1].....	78
III.14.2 Essais traction par flexion : [NF EN P 18-408].....	79
III.14.3 Essais de dureté par rebondissement (scléromètre) [NA EN 12504-2].....	79
III.14.4 Ultrason [NA EN 12504-4].....	80
III.15. Confection des éprouvettes.....	80
III.15.1 Type et tailles des moules et conservation des éprouvettes.....	80
III.16 Conclusion.....	80
<b>CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b>	
IV.1. Introduction.....	81
IV.2. Mise en application des plans d'expériences.....	81
IV.2.1. Mise en application du logiciel « JMP ».....	81
IV.2.2. Représentation graphique des mélanges à 2 constituants.....	82
IV.3. Résultats des essais.....	83
IV.3.1. Résultats des essais à l'état frais.....	83
IV.3.2. Résultats des essais à l'état durci.....	90
IV.4. Conclusion.....	96
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	96

**LISTE DES TABLEAUX**

**CHAPITRE I : REVUE GENERALE SUR LES BAP**

Tableau I.1 Propriétés d’ouvrabilité des BAP .....18

**CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

Tableau III.1 Analyse granulométrique de sable .....55

Tableau III.2. Classification de sable en fonction du module de finesse.....56

Tableau III.3 : La masse absolue de sable.....56

Tableau III.4 : La masse volumique apparente de sable.....57

Tableau III.5 : Porosité, compacité et indice des vides.....57

Tableau III.6 : Équivalent de sable.....59

Tableau III.7 : La classification de la nature du sable en fonction d’ES.....59

Tableau III.8 Composition chimique de sable.....60

Tableau III.11 : Masse volumique apparente du gravier.....61

Tableau III.12 : La masse volumique absolue du gravier.....62

Tableau III.13 : Porosité, compacité et l’indice des vides.....62

Tableau III.14 : l’absorption d’eau de gravier.....63

Tableau III.15 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....64

Tableau III.16 : Classification des roches en fonction du coefficient LA.....64

Tableau III 17 : Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5.....65

Tableau III.18 Les compositions chimiques du CEM II/B 42.5.....65

Tableau III.19 Les compositions minéralogiques du ciment CEM II/B 42.5.....66

Tableau III.20: La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire.....66

Tableau III.21 : propriétés physiques et chimiques de la poudre de céramique.....67

Tableau III.22 : Caractéristique de l’adjuvant « MEDAFLOW 30 ».....68

Tableau III.23 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l’état frais et durci.....68

Tableau III.24 : Analyse chimique de l’eau utilisée.....68

Tableau III.25 : Dosage de superplastifiant de la masse de (ciment + filler).....69

Tableau III.26 composition d’un mètre cube de BAP formulé par la méthode LCPC.....70

Tableau III.27 Composition des bétons témoin pour confectionner 36 l en Kg.....71

Tableau III.28 composition d'un mètre cube de BAP (10%Ca+2% Céramique) formulé par la méthode LCPC.....72

Tableau III.29 Composition des différents bétons pour confection 36 l en Kg.....72

**CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS:**

Tableau IV. 1 différents mélanges à analyser.....82

Tableau IV. 2 Résultats de l'essai d'étalement.....83

Tableau IV.3. Le coefficient de la corrélation R et son ajustement.....84

Tableau IV.4. Facteurs influents sur (DE).....85

Tableau IV.5. Valeurs des essais de stabilisation au tamis (ST).....86

Tableau IV.6. Le coefficient de la corrélation R et son ajustement. ....87

Tableau IV.7. Facteurs influents sur (ST).....87

Tableau IV.8 Caractéristiques rhéologiques des différents BAP mesurées par rhéomètre.....88

Tableau IV.9. Le coefficient de la corrélation R et son ajustement.....89

Tableau IV.10 Facteurs influents sur la viscosité.....89

Tableau IV.11. Résultats des essais de compression.....90

Tableau IV.12. Coefficient de la corrélation R et son ajustement pour RC28.....91

Tableau IV.13. Facteurs d'influence sur RC28.....92

Tableau IV.14. Résultats des essais de traction par flexion.....93

Tableau IV.15. Coefficient de la corrélation R et son ajustement.....93

**LISTE DES FIGURES**

**CHAPITRE I : REVUE GENERALE SUR LES BAP**

Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo.....5  
 Figure I.2 Constituants des bétons Ordinaires et des BAP.....7  
 Figure I.3 Les actions des super plastifiants.....12  
 Figure I.6 Essai au cône d’Abrams.....19  
 Figure I.7 boîte en L.....20  
 Figure I. 8 Essai de la stabilité au tamis.....21  
 Figure I.9 Essai de ressuage à l’aéromètre.....21  
 Figure I.10 -Mesure de la résistance à la compression.....22  
 Figure I.11 Mesure de la résistance à la traction par flexion.....23

**CHAPITRE II : RHEOMETRIE ET PLANS D’EXPERIENCES**

Figure II.1.1: Rhéomètre Two-point-test.....27  
 Figure II.1.2 : Rhéomètre à béton IBB.....27  
 Figure II.1.3 : Rhéomètre BML.....28  
 Figure II.1.4 : Rhéomètre à béton du Cemagref .....28  
 Figure II.1.5 : Rhéomètre à béton BT Rhéom.....29  
 Figure II.1.6 : rhéomètre ICAR.....29  
 Figure II.1.7 : Classification des fluides selon leur comportement rhéologique.....30  
 Figure II.1.8: Mouvement de cisaillement d'un système plaque-plaque.....32  
 Figure II.1.9: Schéma de la vitesse de cisaillement.....33  
 Figure II.1.10 : Glissement des couches.....35  
 Figure II.1.10 : Le corps thixotropie .....36  
 Figure II.1.11 : Système présentant un Anti thixotropie.....37  
 Figure II.1.12 : Représentation schématique des différents types de comportements rhéologiques des matériaux.....38  
 Figure II.2.1 : vocabulaire d’un plan d’expérience.....41

Figure II.2.2 : Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances.....	42
Figure II.2.3 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences.....	43
Figure II.2.4 : 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. ....	45
Figure II.2.5 : 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.....	45
Figure II.2.6 : Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.....	46
Figure II.2.7 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	46
Figure II.2.8 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.....	47
Figure II.2.9 Modélisation par un polynôme d'ordre deux.....	51
Figure II.2.10 Modélisation par un polynôme d'ordre trois.....	51

### CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

<i>Figure III.1 Courbe granulométrique du sable Oued Souf.....</i>	55
<i>Figure III.2 : Essais d'équivalent de sable.....</i>	58
<i>Figure III.4 Courbe granulométrique du gravier 3/8.....</i>	60
<i>Figure III.5 Courbe granulométrique du gravier 8/16.....</i>	61
<i>Figure III.7: Appareil de l'essai Los Angeles.....</i>	63
<i>Figure III.8: Poudre de calcaire utilisée.....</i>	66
<i>Figure III.9: Poudre de céramique blanche.....</i>	67
<i>Figure III.10 : Malaxeur à béton laboratoire de GC.....</i>	73
<i>Figure III.11 : Essai au cône d'Abrams.....</i>	75
<i>Figure III.12 : Essai de boit en L.....</i>	75

*Figure III.13 : Essai de stabilité au tamis exécuté au laboratoire.....76*  
*Figure III.14 : Essais rhéomètre.....77*  
*Figure III.15 : Essai compression.....78*  
*Figure III.16 : Principe de l'essai traction par flexion.....78*

**CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

Figure IV.1. Représentation graphique des mélanges à 2 facteurs.....83  
 Figure IV.2. Graphique des valeurs observées du diamètre de l'étalement (DE) en fonction des valeurs prévues.....84  
 Tableau IV.3. Le coefficient de la corrélation R et son ajustement.....84  
 Figure IV.3. Surface de réponse pour (DE).....85  
 Figure IV.4. Graphique des valeurs observées de la stabilité au tamis (ST) en fonction des valeurs prévues.....86  
 Figure IV.5. Surface de réponse pour la stabilisation au tamis (ST).....88  
 Figure IV.6. valeurs observées de la viscosité ( $\mu$ ) en fonction des valeurs prévues.....89  
 Figure IV.7. Surface de réponse de la viscosité ( $\mu$ ).....90  
 Figure IV.8. Valeurs observées de RC28 en fonction des valeurs prévues.....91  
 Figure IV.9. Surface de réponse de la résistance à la compression à 28 jours.....92  
 Figure IV.10. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....93  
 Figure IV.11. Surface de réponse de Rf28j en fonction des pourcentages de (PC) et (SF).....94

## Les abréviations

AFGC : Association française gène civile.

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

BAP : Béton auto plaçant.

SF : sable fin

SD : sable de dune

Mf : module de finesse du sable

Sp : super plastifiant

PC : poudre de céramique

Rc<sub>28j</sub> : La résistance à la compression à 28 jours.

G : Gravier.

S : Sable.

E : Eau.

C : Ciment.

RC : Résistance mécanique

V ; Viscosité

## INTRODUCTION GENERALE

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. Le béton auto plaçant (BAP) est un béton capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant de moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange est recommandée il faut dire aussi la maniabilité ou l'ouvrabilité du béton puisque vous avez cité le rapport  $e/c$ . Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super-plastifiant. [2]

Un béton auto plaçant (BAP), doit avoir des performances acceptables en terme de rhéologie à l'état frais (bonne fluidité, facilité de coulage et sans ségrégation) ainsi qu'à l'état durci (bonne résistance mécanique).

Cette caractéristique n'est plus suffisante pour identifier les propriétés rhéologiques des bétons auto plaçants. L'utilisation de rhéomètre s'impose dans ce cas, afin d'examiner l'écoulement de ces fluides visqueux, car il permette la mesure des paramètres intrinsèques du matériau en termes de quantités physiques fondamentales.

Afin d'atteindre une meilleure performance d'un BAP, des études ont été effectuées sur l'influence des ajouts et additions minérales. Notre travail s'inscrit dans ce domaine et il vise à valoriser les déchets de la poudre de céramique (PC) traitée thermiquement et teintée, destinée pour les revêtements muraux et pour les sols, dans la confection des bétons et à caractériser la (PC) comme remplace partiel du ciment portland et d'étudier son effet sur le comportement rhéologique et mécanique du béton. Les différents mélanges sont choisis à partir d'un plan d'expérience de type « JMP » où les résultats obtenus seront traités par des modèles mathématiques proposés par ce logiciel afin de déduire l'influence des matériaux utilisés sur les réponses trouvées.

**Les questions qui se posent** et auxquelles nous tenterons de répondre sont : quelle est l'influence des déchets de la poudre de céramique (PC) sur les propriétés rhéologiques de la matrice cimentaire ? Jusqu'à quel pourcentage de remplacement du

ciment par la PC, peut-on arriver pour formuler un BAP stable ? Quelle est l'intérêt de l'utilisation d'un plan d'expérience à partir des résultats obtenus ?

Mais vu les incidents survenus lors de la crise sanitaire liée au covid-19, on a changé les axes et objectifs ciblés de notre recherche parce qu'elle s'appuie sur des résultats expérimentaux, et nous nous sommes limités par l'étude de modélisation par logiciel (JMP) en exploitant des résultats d'une étude précédente effectuée par Meguedem et Touabet [1]. Leur travail avait pour objectif l'évaluation des propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton auto plaçant constitué de différents pourcentages de poudre de céramique teinté (2%, 7%, et 14%) et un pourcentage fixe des fillers de calcaire (10%) comme première étape d'étude, puis étude de l'influence de la granulométrie du sable de dune utilisé en faisant changer sa teneur en particules fines comme deuxième étape.

Il est à noter que nous avons pris les valeurs optimales soit 7% et 14% de (PC).

Ce mémoire est structuré comme suit :

### **Chapitre I : Revue générale sur le béton auto plaçant:**

Consiste à donner une idée générale sur l'apparition, la définition et le domaine d'application du béton auto plaçant.

**Chapitre II :** Consiste d'un rappel des définitions fondamentales, en première partie, sur la rhéologie et les rhéomètres et sur les plans d'expériences comme outils de modélisation dans la deuxième partie.

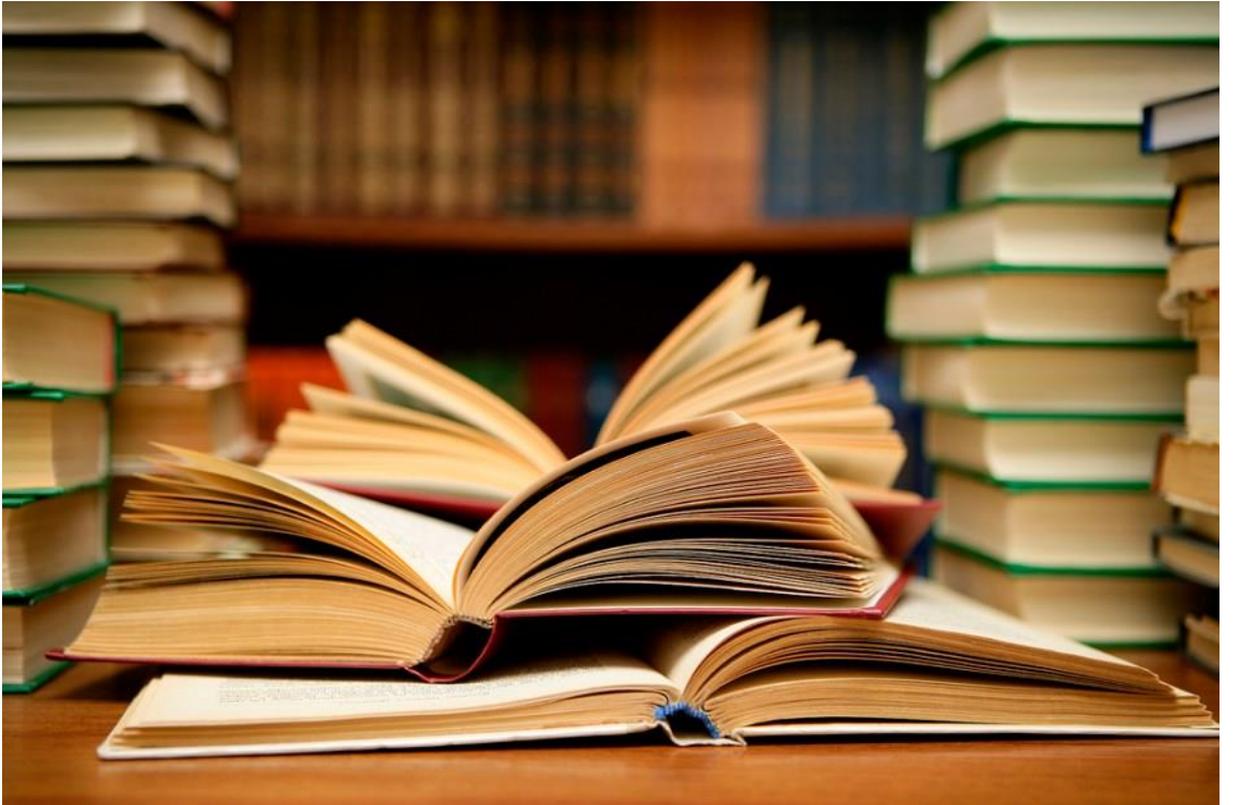
### **Chapitre III : Matériaux, matériels et essais:**

Donne une idée sur les essais utilisés pour la caractérisation physiques, chimiques et mécaniques des matériaux, ainsi que sur les matériels utilisés pour ces essais.

### **Chapitre IV : Résultats et discussions :**

Les résultats obtenus tout au long des différentes phases du projet sont exposés et analysés dans ce chapitre.

Le travail se termine par une conclusion générale avec perspectives qui est un résumé et une conclusion finale de ce travail de recherche.



**CHPITRE I**  
**REVUE GENERALE SUR LES BAP**

## **CHAPITRE I**

### **REVUE GENERALE SUR LES BAP**

#### ***1.1. Introduction***

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

Ce premier chapitre fait l'objet d'une initiation au BAP, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP. [2]

#### ***1.2. Définition du béton auto plaçant***

Ce béton est défini comme : béton auto nivelant, béton auto compactant (Self Compacting Concrète (SCC) ou béton hyper fluide. Toutefois, l'appellation la plus connue aujourd'hui en général est : béton autoplaçant.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, homogènes et stables. La spécificité principale de ces bétons réside du fait qu'ils sont mis en place sans vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes de coffrages les plus complexes, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures très résistantes et durables. [2]

Dans certains cas, on parle de béton autonivelant (BAN) pour les dalles et les parois Horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et les parois verticales.

Les principes de formulation de bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + fines + eau + adjuvants) plus élevé, ils sont caractérisés par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants nommés : super plastifiants hauts réducteurs d'eau.

Une nouvelle vague d'adjuvants appelés : rétenteurs d'eau ou agents de viscosité entrant quelque fois dans leur formulation.

Ces derniers assurent la viscosité de la pâte pour lui conférer des propriétés limitant la ségrégation.

La dernière caractéristique des BAP est la faible teneur de granulats de l'ordre 20 à 25

Millimètres. Pour ce béton, on se fixe de travailler le plus possible avec des granulats de 16mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins à l'état frais, les BAP se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils s'écoulent sous leur poids propre avec un débit suffisant écartant les moyens de vibration [3].

Le BAP s'écoule sans vibration dans les zones confinées ou très ferrillées, tout en gardant une fluidité élevée et une bonne résistance à la ségrégation.

### ***1.3. Historique des bétons auto plaçant***

Ces bétons hyper fluides étaient en même temps stables et connaissaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage.

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

Construire avec cette nouvelle gamme de béton est en train de prendre de l'ampleur à travers le monde, en effet, depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants est en bonne croissance notamment au Japon Les bétons autoplaçants offrent des possibilités d'utilisation très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions ; renforcement ainsi que la réparation d'ouvrage d'art (Application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès); construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour canalisation (béton coulé sous l'eau pour des réparations, béton confiné, pieux...etc.).

Nous citons quelques exemples de réalisations Japonaises :

- ❖ le pont Kiba Parkou 650 m<sup>3</sup> de bétons auto plaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 60Mpa ;
- ❖ Ou 390.000m<sup>3</sup> de béton auto plaçant versés dans les coffrages des fondations et des piliers (OKAMURA et Coll.1994). [4] ;
- ❖ Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde d'une portée de 3910 m (***Figure I.1***) ;

❖ Landmark Tower où un béton auto plaçant de déformabilité remarquable a été mis en place dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune (HAYAKAWA et Coll.1995) [5] ;

❖ le stade de Fukaka où 10.000 m<sup>3</sup> de béton auto plaçant ont été utilisés pour des sections très ferrillées de forme complexe (IZUMI et Coll.1995) [6] ;

Nous notons d'autre part que diverses structures (réservoirs, murs de soutènement, poteaux...etc.) ont été construites en totalité ou en partie avec des bétons auto plaçants.



*Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo. [2]*

#### ***1. 4. Domaine d'utilisation des BAP***

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [9]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

- Densités de ferrailage importantes ;
- Formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ;
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière. [7]

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton auto plaçants. Malgré ça, on pourra encourager les entreprises de construction

algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie. [10]

### ***1.5. Les avantages et inconvénients des BAP***

Les BAP présentent de nombreux avantages : [14]

- Mise en œuvre sans vibration ;
- Bétonnages plus rapides et optimisation de productivité sur chantier ;
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur ;
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage ;
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage ;
- Enrobage des armatures amélioré ;
- Optimisation de la qualité de parement ;
  
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier ;
- Absence de nuisance sonore liée à la vibration

Comme inconvénients, on distingue

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier.

- En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent.

- De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours.

### ***1.6. Composition spécifique des BAP***

La formulation des BAP est basée sur les critères suivants

#### ***a) Une quantité de fines importante :***

La composition des bétons auto plaçants comporte une quantité de fines importante (500kg/m<sup>3</sup> de diamètre inférieur à 80 µm) assurant la maniabilité et limitant les risques de ségrégation et ressuage. Le liant utilisé est généralement un mélange de deux ou trois constituants pour éviter l'élévation de température du béton lors de la prise de ce dernier.

**b) Un volume de pâte élevé :**

Le rôle de la pâte (ciment + addition + eau efficace + air occlus) est d'écarter les granulats pour réduire les frottements provoquant la limitation vis-à-vis de l'étalement du béton et la capacité de remplissage des coffrages.

**c) Utilisation d'adjuvant (super plastifiant) :**

L'ajout des super plastifiants conférant aux BAP leur maniabilité, cet ajout doit être proche du dosage de saturation et jamais très élevé sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneurs en eau vis-à-vis du problème de ségrégation et du ressuage.

**d) Eventuelle utilisation d'un agent de viscosité :**

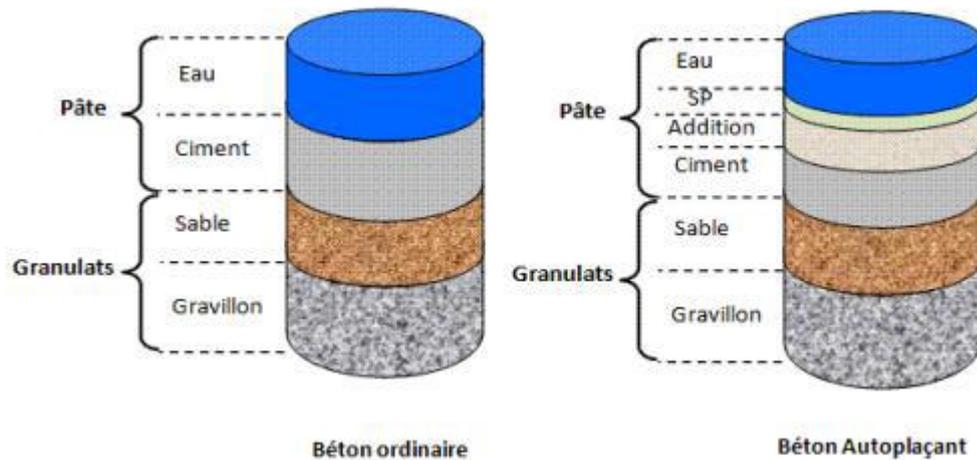
Ces agents sont des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales augmentant la viscosité de l'eau. Ils empêchent le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse. Ces adjuvants tillent pour des bétons ayant des rapports eau/liant élevés, mais leur emploi pour des BAP ayant un faible rapport E/L n'est jamais justifié. Les agents de viscosité sont connus pour rendre les bétons auto plaçants moins sensibles à des variations de la teneur en eau, ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de maniabilité

**e) Un faible volume de gravillon :**

Pour un confinement donné, les risques de blocage croient avec l'augmentation des Teneurs en gros granulats. Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, le diamètre maximal des gravillons dans un BAP étant compris entre 10mm et 20mm. Le rapport G/S pour les BAP est proche de 1.

**I.7. Les constituants du BAP**

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte (voir figure1). Par rapport aux bétons classiques, les BAP ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présents dans la composition du béton. [3]



*Figure I.2 Constituants des bétons Ordinaires et des BAP [3]*

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP.

### ***1.7.1. Le ciment***

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%. [10]

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique,  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , que l'on écrit C3S ;
- Le silicate bicalcique,  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , que l'on écrit C2S ;
- L'aluminate tricalcique,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit C3A ;

– L'aluminoferrite tetracalcique,  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit C4AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice ( $\text{SiO}_2$ ), de 2 % à 9 % d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), et de 1 % à 5 % d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium, (gypse, hélihydrates, anhydrite) et d'additifs. [10]

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton auto plaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEMII/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts. [10]

### ***1.7.2. Les différents types de ciment***

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CME et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [10]

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

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

CEM V : Ciment composé (CLC).

### ***1.7.3. Les additions minérales***

Le béton auto plaçant requiert souvent pour l'amélioration de ses propriétés rhéologiques, l'addition de particules fines inertes ou réactives, qui régulent aussi la quantité de ciment dans la formulation et réduisent ainsi la chaleur d'hydratation cause d'un fort retrait [35].

Ce sont des produits de dimension granulaire inférieure à  $80\mu\text{m}$ , obtenus par broyage fin, récupération des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, silice, etc.) [35].

L'utilisation des ajouts minéraux a des avantages : techniques ; économiques et écologiques.

### • *Avantages économiques et écologiques*

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO<sub>2</sub> de l'industrie cimentière dans la nature [6,17].

### • *avantages techniques*

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique [24].

#### ***1.7.4 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. [10]

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

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 autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants.

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D max augmente. Ainsi, le D max des granulats doit être compris 15 mm ou moins [8]. la plupart des bétons autoplacant  $D_{max}=16$ .

### ***1.7.5 l'eau***

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes :

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de : -15 g/l pour les bétons à haute résistance ;

-30 g/l pour les bétons à faibles résistances

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants. [10]

### ***1.7. 6 le super plastifiant***

Les super plastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de super plastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. [10]

Les super plastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules.

Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées.

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de super plastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu'en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau. [10]

L'utilisation de super plastifiants dont l'action est schématisée sur (Figure I.5) Permet de Concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.

- 1-Augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2-Diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3-Diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

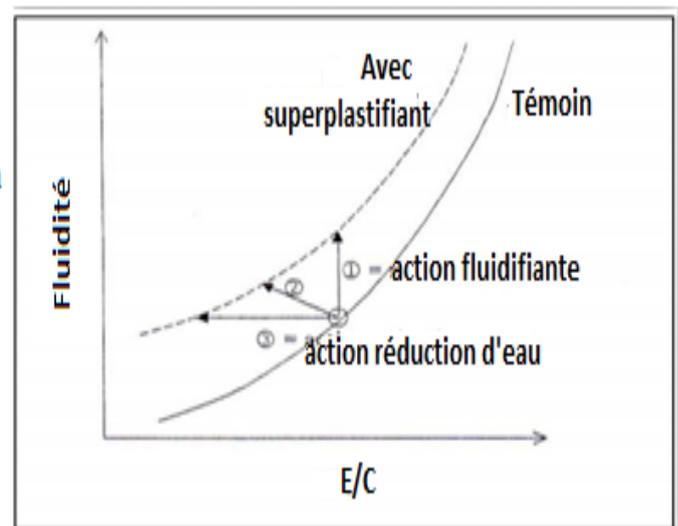


Figure I.3 Les actions des super plastifiants [10]

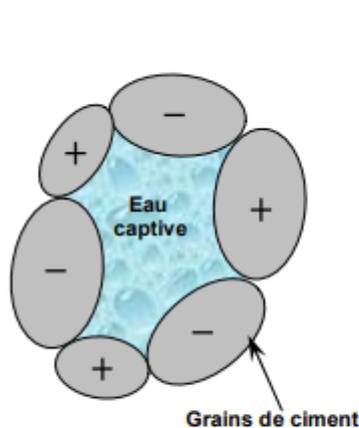


Figure I.4 Pâte de ciment non adjuvante

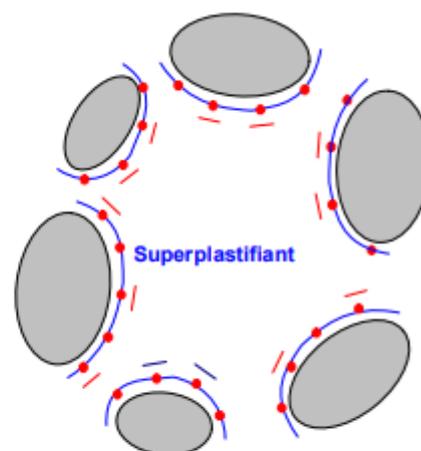


Figure I.5 Pâte de ciment additionnée d'un super plastifiant [20]

### ***1.7.7 Les adjuvants***

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés dans les bétons à des doses précises du poids de ciment et selon leur plage d'utilisation indiquée par le fournisseur. Leur introduction dans le mélange engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes et ils ont pour but d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci. [10]

### ***1.8. Les fillers calcaires***

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NFP18-305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ,
- Une valeur minimale de l'indice d'activité Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

#### ***1.8. 1 Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP***

L'introduction des fillers calcaires dans la composition d'un BAP engendre des modifications significatives sur les propriétés à l'état frais et durcis [11]. A l'état frais les fillers induisant une augmentation de la compacité et par conséquent une baisse du transfert calcaires modifient la structure du squelette granulaire en améliorant la capacité d'empilement des particules fines c'est l'effet granulaire. A l'état durci ils présentent un caractère liant supplémentaire car le calcaire n'est pas strictement inerte du point de vue chimique, en présence d'un liant hydraulique, il conduit à la formation d'hydrates. Aussi ils aident à la réduction de la chaleur d'hydratation, et en conséquence la diminution du retrait endogène, et aussi d'humidité et du retrait de séchage, par contre le gonflement dans le milieu immergé devient plus grand [12].

### ***1.9. Les différentes approches de formulation***

#### ***1.9.1 Méthode de formulation pratique des BAP***

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique, La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée [2]. Car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont les composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années. Certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

– Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.

– La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE [NF EN P18 305], soit en général de 300 à 350 kg En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/ .

Le dosage en super plastifiant est proche de son dosage à saturation, La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

### ***1.9.2 Formulations des BAP existants dans la bibliographie***

De multiples approches sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton auto plaçant. Dans ce qui suit, un exposé général sur les approches principales.

#### ***1.9.2.1 Approche japonaise***

En général, 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 pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances et pour satisfaire les critères d'ouvrabilité.

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.

Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous-dimensionné pour pouvoir éviter les risques de blocages, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). Le béton obtenu est ainsi loin d'un optimum économique. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode par l'utilisation d'additions minérales

(fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) , à augmenter le dosage de sable dans le mortier et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton. [1]

### ***1.9.2.2 Approche CBI (suédoise)***

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement Och Betong Institutet) 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. [4], [5], [6]

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs cités par ([7], [8], [9], [10]) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles.

Passant à travers différents espacements d'armature 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 (roulés ou concassés).

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

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par [1], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

### ***1.9.2.3 Approche LCPC***

L'approche développée en France au LCPC par Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible, 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 [12].

Le modèle permet d'avoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des différents constituants comme par exemple la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre.

Des auteurs [4],[3] ont testé les trois approches et souligné quelques remarques issues des essais qu'ils ont menés. Ils estiment que l'approche LCPC (appuyée par le logiciel développé) donne les résultats les plus satisfaisants.

Toutefois, les trois méthodes décrites, ne sont pas adaptées pour la formulation de bétons auto plaçants contenant des agents de viscosité. L'apport d'un adjuvant de telle nature augmente significativement la viscosité du mélange, ce qui nécessite probablement des ajustements et des modifications importantes sur les méthodes de formulation des BAP.

## ***1.10 caractérisation d'un béton auto plaçant***

### ***1.10.1 propriétés des BAP à l'état frais***

Les propriétés générales d'un béton auto plaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques :

Le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [14], [12].

### ***1.10.2 le remplissage***

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto plaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects. [14]

### ***1.10.3 la résistance à la ségrégation***

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases

solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [15, 16].

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

#### ***1.10.4 la capacité de passage***

Le béton auto plaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. [14]

Donc, un béton est qualifié d'auto plaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en dans le tableau I.1 oeuvre

En France, trois essais de caractérisation des bétons auto plaçant à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » en juin 2000. [14]

Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence pour valider une formule de BAP.

L'ouvrabilité des bétons auto plaçant se décompose en trois caractéristiques :

- La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
- La mobilité en milieu confiné (décrit par la boîte en L) ;
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage). [9]

#### ***1.11. Caractérisation des BAP à l'état frais***

Lors de la formulation la caractérisation des BAP est nécessaire, Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place depuis son développement. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier les différentes propriétés citées ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton de par sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage. Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité qui caractérisent les bétons auto plaçants.

**Tableau I.1 Propriétés d'ouvrabilité des BAP.**

<b>Propriétés d'un BAP</b>	<b>Moyens d'obtention</b>	<b>Actions à mener dans la formulation</b>
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface
		Utilisation d'agents de viscosité
Résistance à la ségrégation	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

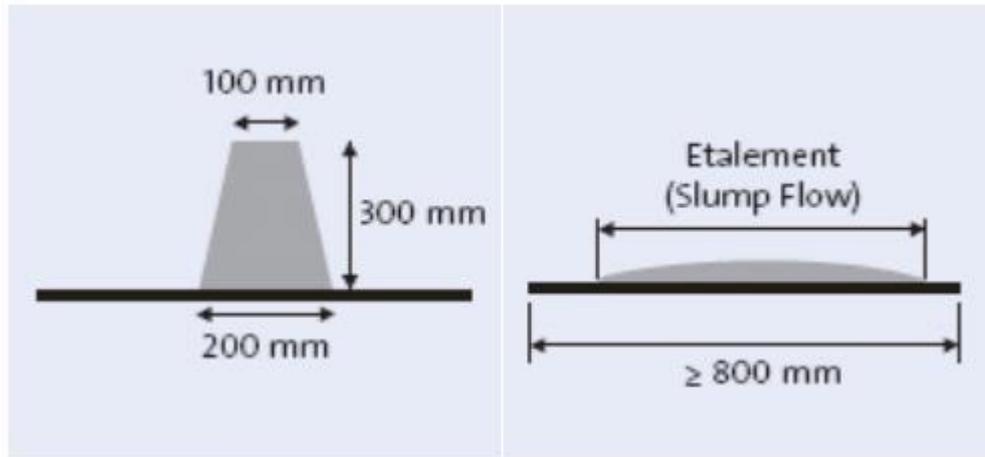
### **I.11.1 Essai de l'étalement (Essai au cône d'Abrams)**

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (figure I.6).

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un

béton auto plaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [10].

Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).



**Figure I.6 Essai au cône d'Abrams [10]**

- **Mesure de l'essai de l'étalement**

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le  $T_{50}$  est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de  $T_{50}$  traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton auto plaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [10], Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons auto plaçants avec une faible vitesse de déformation.

### ***1.11.2 Ségrégation dynamique (Essai de la boîte en L)***

La boîte en L permet de caractériser la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures.

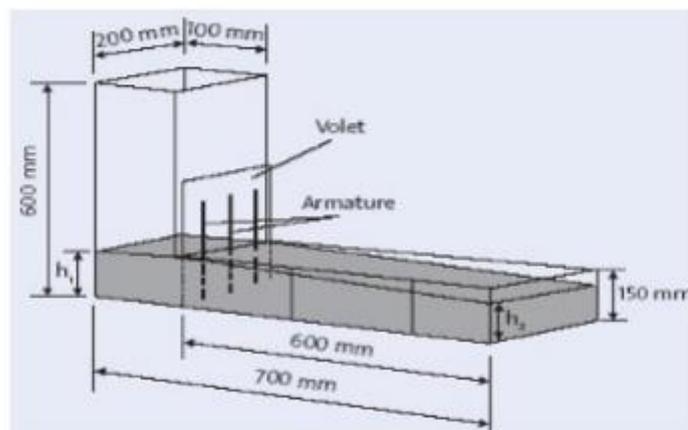
Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes

endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures bloquant alors l'écoulement du béton.

Le principe de cet essai (figure I.7), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 min puis enlève la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. On mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le taux de remplissage  $H_2/H_1$ .

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrailés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [1], le taux de remplissage doit être supérieur à 0,8.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation, il convient donc de diminuer le rapport G/S (augmenter la quantité de sable, ou diminuer celle des graviers), ou d'augmenter le volume de la pâte en maintenant le rapport E/C constant.



*Figure I.7 boîte en L. [12]*

### ***1.11.3 Essais de ségrégation statique (Essai de la stabilité au tamis)***

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage.

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.8). L'essai est développé par la société « GTM construction », il permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la

dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [16].



**Figure I. 8 Essai de la stabilité au tamis. [16]**

***Critères d'acceptabilité :***

La mesure du pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton auto plaçants de la façon suivante :

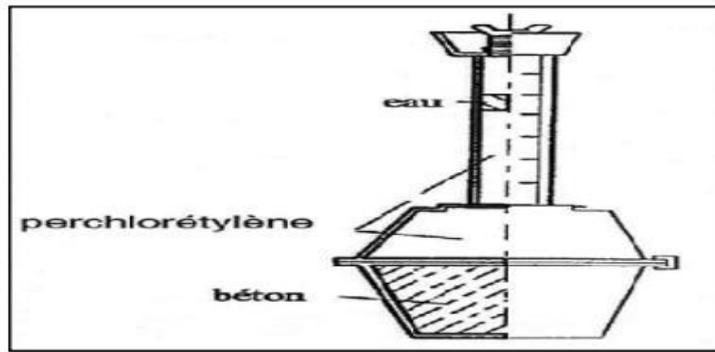
- $0\% \leq \text{Plaitance} \leq 15\%$  → stabilité satisfaisante.
- $15\% < \text{Plaitance} \leq 30\%$  → stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)
- $\text{Plaitance} > 30\%$  → stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

***I.11.4 Ressuage***

Un BAP doit maintenir sa fluidité pendant la durée nécessaire pour son acheminement et sa mise en place. Or, pendant ce temps en vertu de la loi de la gravité, les matières solides ont tendance à s'enfoncer, tandis qu'une partie de l'eau de gâchage et des fines remontent en surface de l'échantillon de béton frais, créant ainsi le ressuage.

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, (figure I.9)).le volume d'eau libérée par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.



*Figure I.9 Essai de ressuage à l'aéromètre.*

### ***I.12 Caractérisation d'un béton auto plaçant à l'état durci (destructif et non destructif :***

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

a) Les essais destructifs:

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction par flexion ;

b) Les essais non destructifs :

- Essai au scléromètre
- Essai d'auscultation dynamique

#### ***A) Essais destructifs du béton***

##### ***I.12.1 Les essais de compression***

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme.

Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (FigureI.8). La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée. [18]



*Figure I.10 -Mesure de la résistance à la compression. [18]*

### ***I.12.2 Les essais de traction par flexion***

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure I.9). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. La résistance à la

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

$Mf = F.L/4$ , où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme. [11]



***Figure I.11 Mesure de la résistance à la traction par flexion. [18]***

### ***B) Essais non destructifs du béton***

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Le contrôle par essais destructifs nécessite la confection d'éprouvettes prélevées représentant un échantillon. Ce contrôle ne peut être effectué à 100 % ou tout au moins sur un échantillonnage significatif. De plus, l'échantillon prélevé n'est pas toujours représentatif du béton de la structure réelle. Ainsi, pour répondre à ces problèmes, on a

développé une gamme d'essais in situ appelés « Essais non destructifs » venant compléter les essais destructifs.

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments. [18]

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en oeuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

### ***Principaux domaines d'application***

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

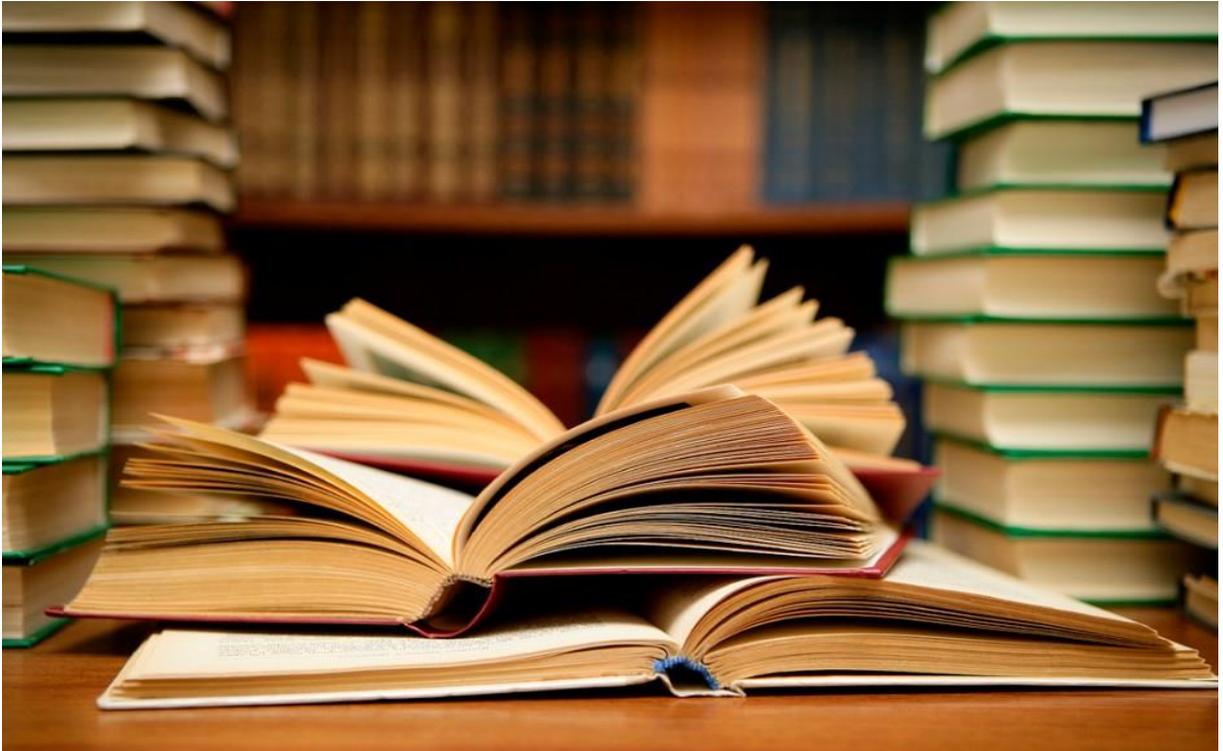
#### ***-Avantages de ces méthodes :***

Les méthodes non destructives présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée ;
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps ;
- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction ;
- Une progression plus rapide et plus économique ;

### ***I.13 Conclusion***

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons auto plaçants, L'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation. Cependant, il lui faut assurer une fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation, une capacité de passage dans les milieux confinés et une excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.



## **CHPITRE II RHEOMETRIE ET MODELISATION PAR PLAN D'EXPERIENCES**

***PARTIE 01 : LA RHEOMETRIE***

***PARTIE 02 : LES PLANS D'EXPERIENCES***

## **CHPITRE II**

### **RHEOMETRIE ET MODELISATION PAR PLAN D'EXPERIENCES**

#### **PARTIE 01 : LA RHEOMETRIE**

##### ***II.1.1. Introduction***

La rhéologie est définie comme étant la science qui traite l'écoulement, les déformations, et plus généralement la viscosité des matériaux sous l'action des contraintes. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides [42, 43].

L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [44], avec l'apparition de nouvelles substances aux comportements complexes tels : pâtes, suspensions, polymères, etc.

Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de son écoulement alors qu'il est encore à l'état frais. Le béton composé de particules de ciment, de granulats, d'eau et d'air, peut être caractérisé comme des particules solides en suspension (agrégat) dans les fluides visqueux (pâte de ciment).

La caractérisation quantitative des propriétés rhéologiques est importante pour les raisons suivantes :

- l'ouvrabilité du béton frais constitue un des fondements de la conception de béton
- le comportement de l'écoulement du béton frais présente des impacts sur la qualité des propriétés du béton durci
- le placement du béton qui comprend le transport, le pompage, le coulage et la vibration, est affecté par la viscosité plastique et la limite d'élasticité du béton frais.

### ***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. Rhéologie des BAP***

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 à 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 [41].

### ***II.1.4. Les rhéomètres***

Les rhéomètres sont des appareils utilisés pour réaliser des mesures rhéométriques et déterminer le comportement rhéologique des matériaux.

Tous les rhéomètres ne fonctionnent pas de la même manière. On peut les classer suivant leur régime :

- Les rhéomètres à régime permanent : ils déterminent les caractéristiques en écoulement des substances liquides.
- Les rhéomètres à régime transitoire : ils déterminent les caractéristiques viscoélastiques des substances liquides et solides [1].

### ***II.1.5. Appareils de mesures de rhéologie***

L'étude de la rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. À ce jour, plusieurs études en laboratoire ont été réalisées. Plusieurs rhéomètres à béton sont maintenant disponibles sur le marché permettant de mesurer les paramètres rhéologiques du béton. Dans cette perspective, on présente quelques rhéomètres qui sont approuvés et utilisés pour estimer les paramètres rhéologiques dans certains travaux de recherche.

### ***II.1.5.1. Rhéomètres agitateurs-malaxeurs (Two-point-test, IBB)***

Le premier des appareils rhéomètres de type malaxeur est créé en 1987 par Tattersall et al [45] appelé MK1, il s'agit du Two-point-test. Cet appareil est, en fait, un malaxeur instrumenté qui permet de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. Le principe de l'appareil a été modifié en changeant la géométrie de l'agitateur pour donner les deux versions MK2 et MK3. Le MK2 est conçu pour les bétons de grande maniabilité (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams). L'agitateur de forme cylindrique est garni de pales de forme hélicoïdale ininterrompue. Il s'agit d'un des appareils les plus utilisés en laboratoire. Le MK3 est utilisé pour les bétons de faible maniabilité (affaissements inférieurs à 50 mm). L'agitateur en forme de H effectue lors des essais un mouvement planétaire (figure II.1.1). Ce mouvement permet de conserver l'échantillon homogène lors des essais.



***Figure II.1.1: Rhéomètre Two-point-test [46]. Figure II.1.2 : Rhéomètre à béton IBB [47].***

Le rhéomètre IBB est développé en 1994 par Beaupré et al. [47]. Cet appareil est complètement automatisé (figure II.1.2). Les vitesses et les couples sont mesurés et enregistrés automatiquement, sur l'ordinateur à l'aide d'un capteur de vitesse et d'une cellule de charge placée sur l'arbre principal. Il peut mesurer les paramètres rhéologiques de divers bétons jusqu'à des affaissements de 25 mm.

### ***II.1.5.2. Rhéomètres à cylindres coaxiaux (BML, Cemagref)***

Le rhéomètre BML (building material learning) est un rhéomètre à cylindre coaxial avec une rotation de cylindre extérieur tandis que le cylindre intérieur est fixe (figure II.1.3). Ils ont été développés par Wallevik et Gjørsvik [48]. Les cylindres sont munis de redans parallèles à leur

axe. Ces géométries permettent de limiter le glissement à la surface des cylindres. La consommation du béton est importante au cours de cet essai (17 litres). Il est à signaler que cet appareil est entièrement piloté par ordinateur.



*Figure II.1.3 : Rhéomètre BML [49]*

D'après Coussot et al [49], Le Rhéomètre du Cemagref est un rhéomètre à cylindres coaxiaux avec une rotation du cylindre interne contrairement au BML. Il a été utilisé dans le domaine de la géotechnique, plus précisément dans la mesure rhéologique des boues et des laves torrentielles. Il nécessite une quantité importante du béton (500 litres) pour effectuer un essai (figure II.1.4).



*Figure II.1.4 : Rhéomètre à béton du Cemagref [49]*

### ***II.1.5.3 Rhéomètre plan-plan (BT Rhéom)***

Le BT Rhéom est un rhéomètre composé de deux plans un en rotation et l'autre fixe (figure II.1.5). Ce rhéomètre est développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Paris par une équipe dirigée par De Larrard au début des années 1990 [50]. Il peut inclure 7 litres de béton. L'avantage de ce rhéomètre est que les paramètres rhéologiques sont calculés et obtenus directement en unité fondamentale et il peut être utilisé sur chantier comme en laboratoire.



*Figure II.1.5 : Rhéomètre à béton BT Rhéom [50].*

### ***II.1.5.4 Rhéomètre ICAR***

A ce titre, Koehler E. et al. (2004) ont développé le rhéomètre ICAR, un appareil type agitateur-malaxeur portable avec une géométrie vanne, composé d'un agitateur, d'un récipient et d'une pale en acier à 4 faces (figure II.1.6), qui doit être placée au centre du béton (C.à.d. doit être placée à niveau de 13 cm par rapport au fond des récipients et doit être entièrement ouverte de 13 cm de béton). Les dimensions du récipient et de la pale varient en fonction du diamètre maximal des granulats. Adapté pour des bétons ayant des affaissements supérieurs à 50 mm jusqu'à des bétons auto plaçants, ce rhéomètre est plus efficace pour les bétons incorporant de grandes quantités de fines et pour les bétons thixotropes car la méthode d'essai ajoute de l'énergie au béton et fournit, en conséquence, une mesure dynamique.



*Figure II.1.6 : rhéomètre ICAR [50]*

### II.1.6. 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, rapport E/L), de la nature et de la teneur des granulats (sable, gros granulats), des différentes interactions entre les particules (hydrodynamiques, frictionnelles ...etc.) et des conditions expérimentales. A travers la littérature [51,52], on peut classer les fluides selon leurs comportements rhéologiques (Figure. II.1.7). à savoir que les matériaux cimentaires considérés comme des suspensions de particules de tailles différentes dans un fluide de viscosité variable

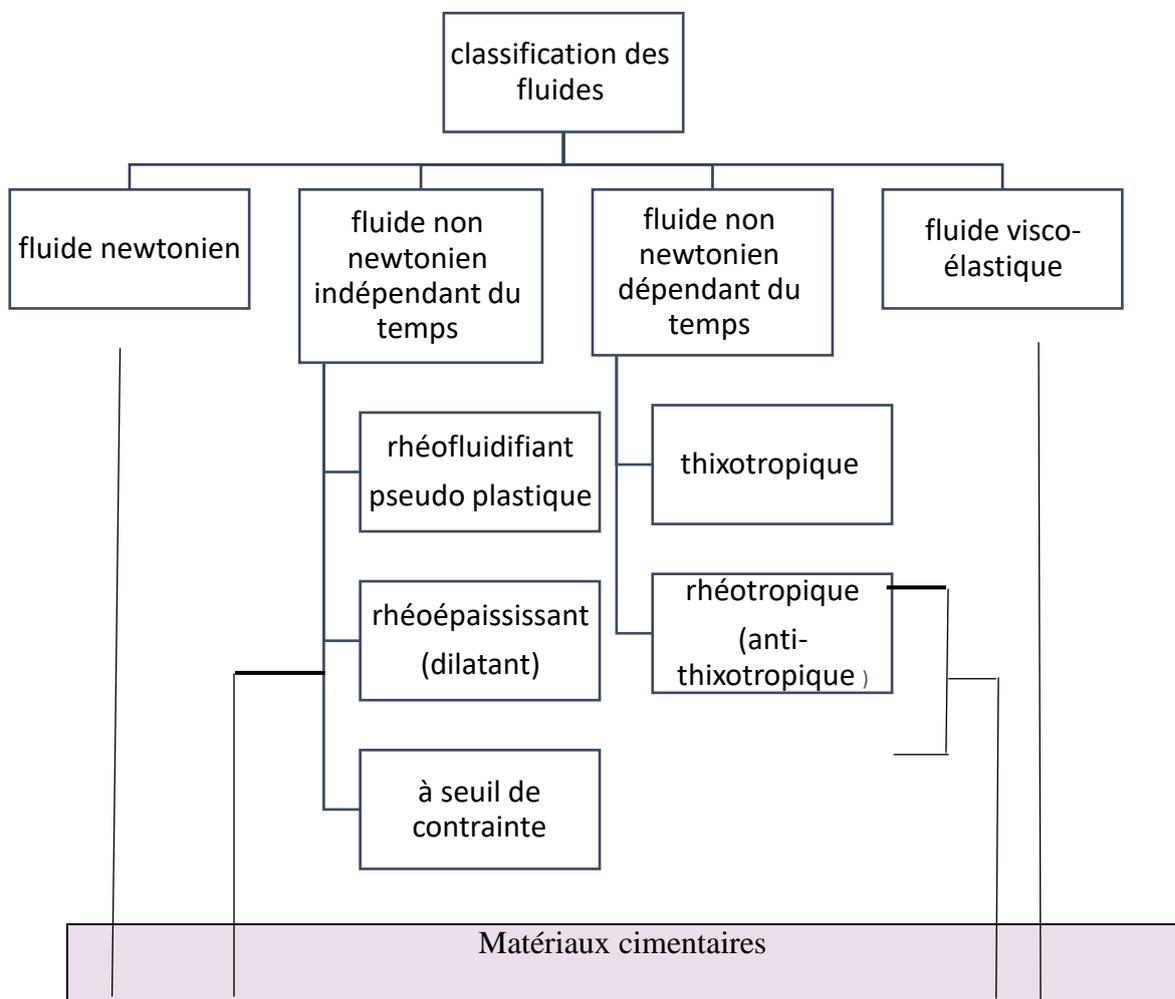


Figure II.1.7 : Classification des fluides selon leur comportement rhéologique [52,53].

### ***II.1.7. Notions générales***

#### ***II.1.7.1. Ouvrabilité***

L'ouvrabilité d'un béton a été définie comme étant "une caractéristique qui détermine la facilité d'un béton ou d'un mortier dont le malaxage, la mise en place et la vibration se sont déroulés dans des conditions aisées et homogènes". En condition de chantier, l'outil de caractérisation de l'ouvrabilité le plus courant dans le monde est le cône d'Abrams utilisé pour le test d'affaissement. [54]

#### ***II.1.7.2. Dilatance***

La dilatance est l'augmentation du volume d'un fluide pendant le cisaillement. Des suspensions concentrées de particules, faisant glisser l'un devant l'autre conduisent à une telle expansion en volume. La dilatance ne doit pas être confondue avec l'épaississement de cisaillement sur le comportement [54].

#### ***II.1.7.3. Rhéologie***

La rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. En effet, les bétons relevant d'une telle approche, c'est-à-dire suffisamment fluides, sont d'emploi assez récent. D'autre part, on s'est contenté longtemps d'une approche technologique, consistant à soumettre un échantillon de béton à une sollicitation plus ou moins contrôlée, et à en tirer un indice (hauteur d'affaissement, temps d'écoulement, compacité, etc.) permettant de classer les mélanges en termes de maniabilité. Le fait que les classements obtenus avec différents essais ne coïncident pas entre eux montre les limites d'une telle approche. [55]

Tattersall a été l'un des pionniers de la rhéologie du béton frais, en proposant, au moyen d'un malaxeur instrumenté, une caractérisation plus complète de l'écoulement de ce matériau.

Il a proposé de décrire le comportement du béton frais au moyen du modèle de Bingham, de la forme :  $\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$

Où

- $\tau$  : la contrainte de cisaillement appliquée au matériau ;
- $\tau_0$  : le seuil de cisaillement (en Pa) ;
- $\mu$  : la viscosité plastique (en Pa.s) ;
- $\dot{\gamma}$  : le gradient de vitesse (appelé aussi vitesse de cisaillement) [55] ;

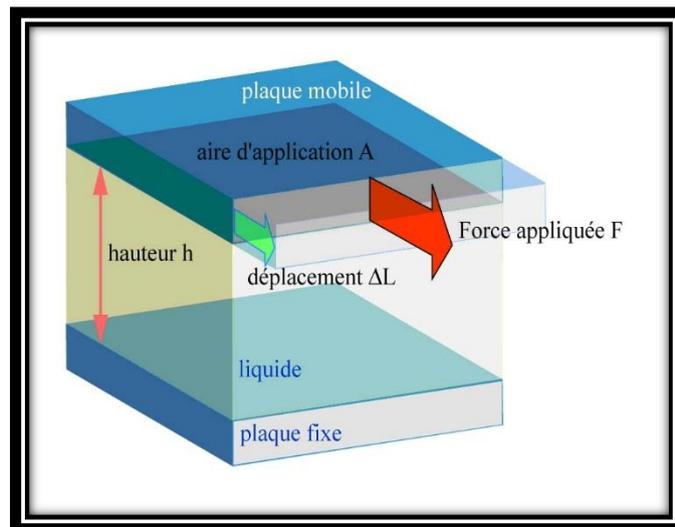


Figure II.1.8: Mouvement de cisaillement d'un système plaque-plaque [55]

#### II.1.7.4. Contrainte de cisaillement $\tau$

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les « couches » sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Il en résulte l'apparition de contraintes  $\tau$ , qui s'exerce tangentiellement à la surface de la couche. [56]

Donc, on peut dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide avec :

- $\tau = \frac{dS}{dF}$  Où :
- $dS$  : surface élémentaire d'une couche cisillée.
- $dF$  : projection de la force de frottement tangentielle.

#### II.1.7.5. Seuil de cisaillement $\tau_0$

Le seuil de cisaillement  $\tau_0$  est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour qu'un fluide, soumis à une déformation de cisaillement, s'écoule. En dessous de cette valeur, ce dernier se comporte comme un pseudo-solide (pas de déformations permanentes). Il existe différentes méthodes pour mesurer le seuil de cisaillement, qui mènent parfois à des notions physiquement différentes. [57]

Le seuil statique correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement. En effet, la méthode de mesure est appliquée à une suspension vierge de toute sollicitation (à part le malaxage dans le cas de mélange), donc une suspension initialement

structurée. Le seuil de cisaillement statique peut être déterminé en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension.

Par contre, le seuil de cisaillement dynamique ( $\tau_0$  dans l'équation du modèle de Herschel-Bulkley) 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 suffisamment élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement en faisant varier le 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. Par conséquent, la valeur du seuil de cisaillement statique est logiquement supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière cisailée lors de l'écoulement.

### II.1.7.6. Vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$

Considérons un matériau comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre 2 plans parallèles de surface séparés d'une distance  $h$ . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance  $dx$  à une vitesse constante de norme  $V_0$ .

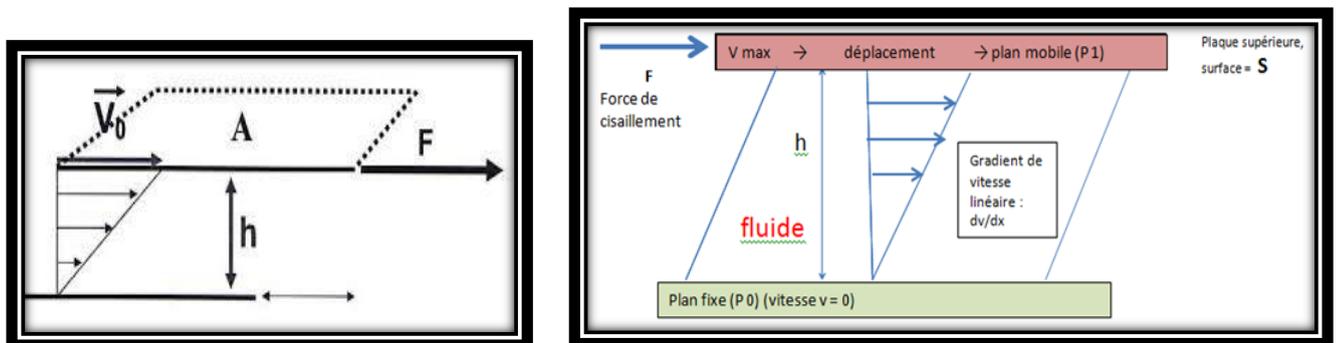


Figure II.1.9: Schéma de la vitesse de cisaillement [57].

Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse.

Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Ils se créent un gradient de vitesse entre les deux plans.

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole  $\gamma$  suivant la

relation :

$$\gamma = \frac{dx}{dz}$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement.

Appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement, il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement. [56]

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

### ***II.1.7.7. Viscosité***

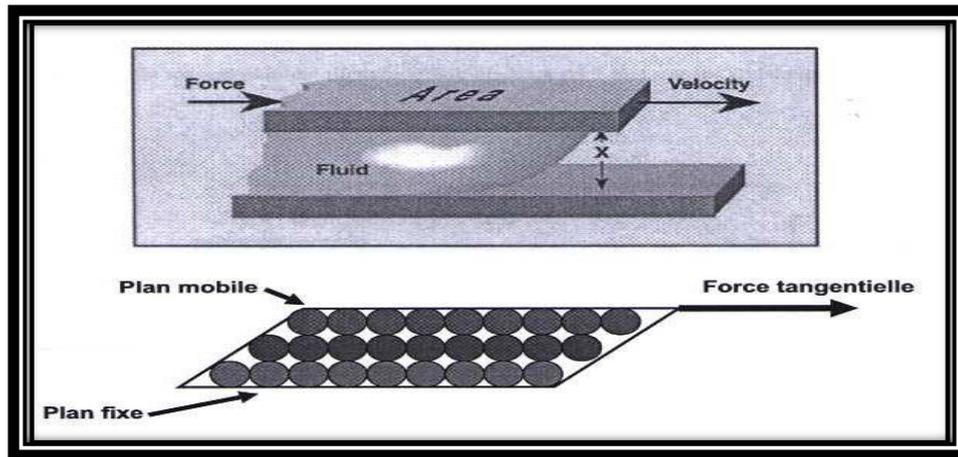
C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Elle peut être mesurée par un viscosimètre à chute de bille, dans lequel on mesure le temps écoulé pour la chute d'une bille dans le fluide. Elle peut également être mesurée par un récipient dont le fond comporte un orifice de taille standardisée. La vitesse à laquelle le fluide s'écoule par cet orifice permet de déterminer la viscosité du fluide.

La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement sur les autres couches adjacentes [54].

On distingue la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

#### ***II.1.7.7.1. Viscosité dynamique $\mu$***

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumise à une contrainte tangentielle, une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente ; en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, Provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé la viscosité. [56]



*Figure II.1.10 : Glissement des couches [56].*

La viscosité est la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle.

Le coefficient de viscosité est une grandeur physique qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologie du matériau. On distingue différents types de viscosité (tangente, apparente). Dans notre étude, nous exploiterons principalement la viscosité apparente. Ce paramètre est défini par la relation suivant :

#### ***II.1.7.7.2. Viscosité cinématique $\nu$***

C'est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide,  $\rho$  étant la densité du fluide,  $\nu$  la viscosité cinétique. On définit la viscosité cinétique  $\nu$  d'un fluide à partir de sa viscosité dynamique  $\mu$  par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}$$

Elle correspond au temps qu'il faut à un fluide pour s'écouler dans un tube capillaire par la force de gravité. Son unité est le  $\text{m}^2/\text{s}$ , mais on utilise plus fréquemment l'ancienne unité, le stockes ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) ou, en pratique, le centistokes (cSt), équivalent à  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$  [56].

#### ***II.1.7.8. Fluide newtonien***

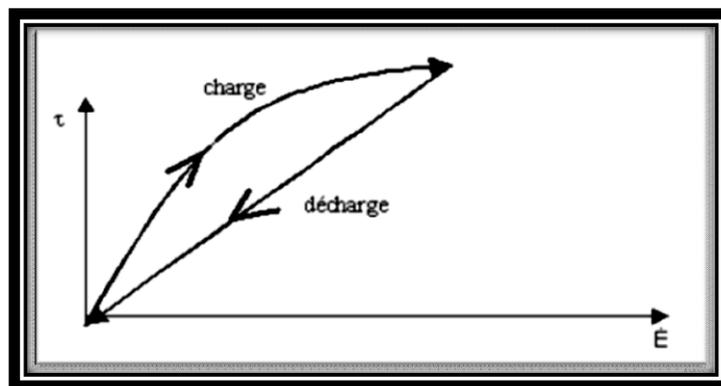
Un fluide parfait (purement visqueux) est souvent représenté par une corrélation linéaire, qui est caractérisée essentiellement par une proportionnalité entre contrainte et vitesse de cisaillement.

Dans un écoulement newtonien, la contrainte varie linéairement en fonction de la vitesse de cisaillement. L'avantage du modèle est qu'il requiert uniquement la viscosité absolue  $\mu$ . [58]

### ***II.1.7.9. La thixotropie et anti thixotropie***

#### ***II.1.7.9.1 : 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 [1].



**Figure II.1.10 : Le corps thixotropie [1].**

#### ***II.1.7.9.2. 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. [1]

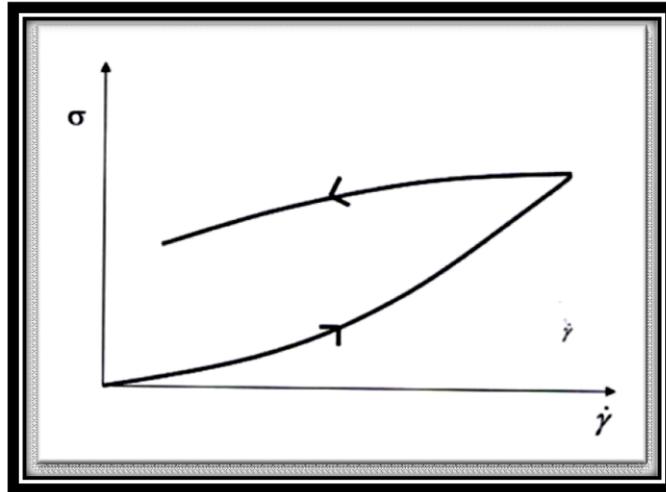


Figure II.1.11 : Système présentant un Anti thixotropie.

### II.1.8. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique

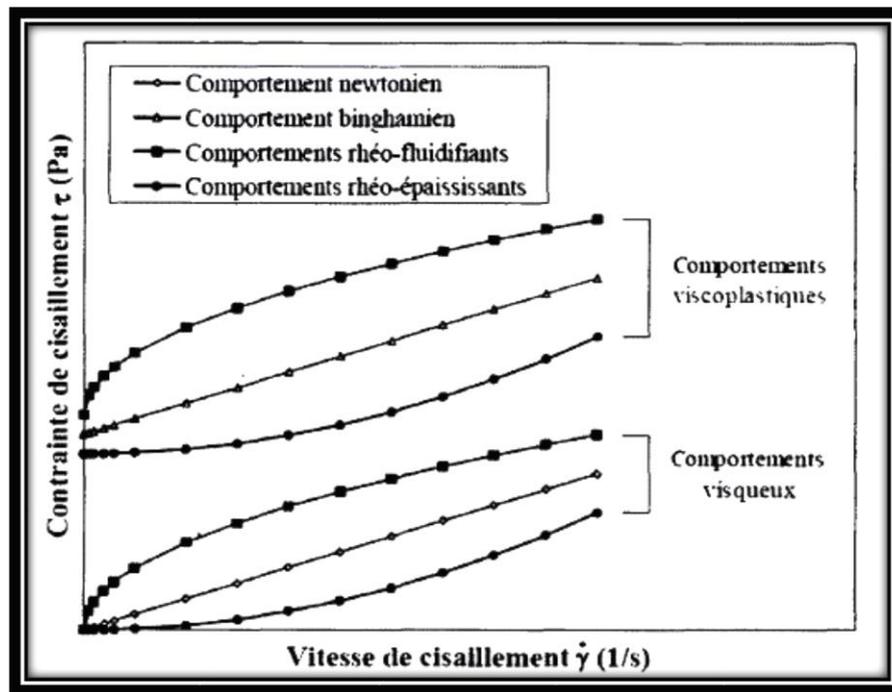
La rhéologie permet de déterminer une relation entre la déformation  $\gamma$  et la contrainte  $\sigma$  qui leur est appliquée en tenant compte de l'histoire d'application de la contrainte. Cette relation, appelée loi de comportement ou équation rhéologique, est souvent exprimée sous la forme d'une équation dans le cas du cisaillement simple entre la contrainte de cisaillement  $T$  et la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  qui est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement  $\gamma$  et qui doit être non nulle lors de l'écoulement. [1]

La contrainte de cisaillement  $\tau$  est un facteur déterminant pour caractériser les fluides. On peut classer les fluides en deux grandes catégories :

- les fluides qui s'écoulent sans avoir besoin de contrainte de cisaillement minimale : on dit que ces fluides ont un comportement visqueux.
- les fluides qui ont besoin d'une contrainte de cisaillement  $\tau_0$  minimale pour s'écouler : on parle de comportement viscoélastique.

En fonction de la concavité des modèles de la courbe  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , on définit deux comportements supplémentaires : rhéo-fludifiant et rhéo-épaississant :

On parle de comportement rhéo-fludifiant lorsque la courbe  $\tau = f(\dot{\gamma})$  présente une concavité tournée vers l'axe des  $\dot{\gamma}$ , soit  $\frac{d^2(\tau)}{d\dot{\gamma}^2} < 0$  et on parle de comportement rhéo-épaississant lorsque la courbe  $\tau = f(\dot{\gamma})$  présente une concavité tournée vers l'axe des  $t$ , soit  $\frac{d^2(\tau)}{d\dot{\gamma}^2} > 0$ . [1]



*Figure II.1.12 : Représentation schématique des différents types de comportements rhéologiques des matériaux. [1]*

### **II.1.9. Évaluation expérimentale de la rhéologie des bétons**

L'évaluation de l'ouvrabilité se fait uniquement sur la base de la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams, Cet affaissement est obtenu après une mise en mouvement du matériau due au poids propre, suite à l'extraction du moule. La mesure est faite une fois que le béton trouve une position de stabilité, c'est-à-dire quand le taux de cisaillement qui est corrélé à la vitesse de mouvement est nul. C'est pour cette raison que l'affaissement est une grandeur rhéologique dont le sens physique est corrélé au seuil de cisaillement.

Sur ce dernier point, la caractérisation de bétons très fluides par le cône d'Abrams s'est avérée insuffisante, car n'étant facilement corrélée qu'à la valeur de seuil. Comme les bétons très fluides sont de plus en plus fréquents, de nombreuses nouvelles méthodes de caractérisation de la rhéologie des bétons frais ont émergé afin de tenter de rendre compte

De la viscosité. Pour caractériser un béton fluide, il apparaît clairement que le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité sont deux informations indispensables. La détermination précise de ces paramètres n'est actuellement possible qu'à l'aide d'un rhéomètre à béton. Le coût de ces appareils (pourtant très faible par rapport à la valeur des quantités de béton produites), la complexité de leur utilisation à l'échelle industrielle et peut-être le nombre réduit d'appareils disponibles (BML Cemagref, BTRheom, IBB and Two Points Test, Vane Test, etc.)

font que leur usage est encore extrêmement réduit, voire confidentiel dans les laboratoires de recherche. Par ailleurs, le problème principal sur lequel butent toutes les méthodes est lié au calibrage du dispositif d'essai. La dispersion des résultats est un facteur qui réduit considérablement la confiance de l'opérateur dans la mesure qu'il effectue. C'est sûrement la raison essentielle pour laquelle le cône d'Abrams reste depuis 1919 l'outil de référence pour caractériser le béton frais, car sa calibration simple et sans équivoque ne prête pas à confusion. Il reste que ce test, au travers de la mesure de l'affaissement, reflète seulement la contrainte seuil, ce qui est insuffisant pour les bétons fluides. Des tentatives de détermination de la viscosité basées sur la mesure du diamètre de galette formée après affaissement ont montré les limites de cette possibilité. À partir de ce bref constat, les développements doivent se poursuivre afin de trouver une solution simple et fiable adaptée aux besoins de l'industrie.

Par ailleurs, il est tout à fait concevable que deux bétons aient exactement le même affaissement au slump test, mais affichent un comportement à l'écoulement très différencié lors de la mise en œuvre. La différence de viscosité plastique est à l'origine de ce phénomène. La viscosité plastique est la propriété qui gouverne le temps mis par le béton pour atteindre sa position d'équilibre à l'affaissement [59].

### ***II.1.10. Évaluation de la rhéologie pendant le malaxage et le transport***

Le malaxage est la première étape dans le processus de fabrication du béton. De la qualité du malaxage dépend l'homogénéité structurelle du béton. Dans ce domaine, les travaux du Laboratoire central des ponts & chaussées ont montré l'influence du paramètre malaxage sur l'homogénéité du béton en sortie du camion toupie et sur la caractérisation de la rhéologie en malaxeur de laboratoire ou de centralier. Il a ainsi été montré qu'à partir de la courbe de puissance enregistrée pendant le malaxage, il est possible d'extraire des grandeurs physiques telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du béton. Par ailleurs, l'analyse du processus de fabrication du béton montre que la phase transport, notamment juste avant mise en œuvre, est certainement la plus adéquate afin de mesurer les propriétés rhéologiques. C'est d'ailleurs le moment généralement choisi pour faire un test au cône d'Abrams. Cela permet, en outre, de vérifier que le temps de transport n'a pas affecté la rhéologie prévue lors du dosage avant malaxage.

On construit ainsi un rhéogramme Vitesse de cuve/Couple de malaxage similaire à celui obtenu à l'aide d'un rhéomètre. On observe ainsi, une bonne corrélation du seuil de cisaillement donné par la bétonnière et celle d'un rhéomètre à béton. Des résultats contradictoires sont toutefois encore constatés pour la viscosité [60].

### ***II.1.11. Perspectives en rhéologie des bétons***

Les matériaux cimentaires se distinguent par une distribution granulaire allant du nanomètre au centimètre. Sur la pâte de ciment fluide, l'échelle nanométrique n'est pas encore véritablement investiguée. Toutefois, avec l'émergence d'outils d'observation et de mesure tel que le rhéomètre utilisant la technologie IRM (Imagerie par résonance magnétique) ou encore la nouvelle génération de capteur MEMS (Micro electro mechanical system, de nouvelles perspectives s'ouvrent. La taille de ces capteurs (humidité, pression, thermique...) — qui est de l'ordre du micron, voire moins, — en mesure d'être immergé au cœur du matériau, vont nous permettre d'ausculter la matière à une échelle qui nous n'est pas accessible actuellement.

À cette condition, nous pourrions explorer de nouvelles voies pour étudier, par exemple, les qualités mécaniques et physiques des bétons de parement. Le problème récurrent du bullage est, à ce titre, une vraie préoccupation industrielle. Plus précisément, il s'agit d'obtenir sur des produits préfabriqués conçus à l'aide de bétons très fermes en moins d'une minute, un aspect de surface à la porosité la plus fine possible (échelle micrométrique au lieu du millimètre actuellement). L'imperméabilité accrue, résultat d'une porosité largement abaissée, induira automatiquement une meilleure résistance mécanique du béton ainsi qu'une barrière étanche aux attaques acides provenant de l'environnement agressif.

Sur cette thématique, à l'inverse des bétons courants ou très fluides, il n'existe quasiment pas aujourd'hui de méthode expérimentale pour évaluer les propriétés rhéologiques des bétons très fermes. D'où l'intérêt de développer un outil à même de discriminer des bétons très fermes de manière quantitative à l'aide de grandeurs rhéologiques. Il s'agit de comprendre aussi le mécanisme de migration de l'air occlus par le malaxage lors de la mise en œuvre vers les parements [61].

### **II.1.12. Conclusion**

Le développement technologique des rhéomètres vise essentiellement une caractérisation rhéologique complète permettant une caractérisation d'ouvrabilité sans avoir recours aux tests empiriques. Ces derniers sont souvent jugés dépendants de la compétence et de l'expérience de l'opérateur, par contre les valeurs du seuil et de la viscosité sont beaucoup moins dépendantes de facteurs. Par conséquent, une corrélation entre les grandeurs rhéologiques et les propriétés d'ouvrabilité est donc jugée très importante.

## PARTIE 02: Les PLANS D'EXPERIENCES

### II.2.1. Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [59]. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y=f(x_i)$$

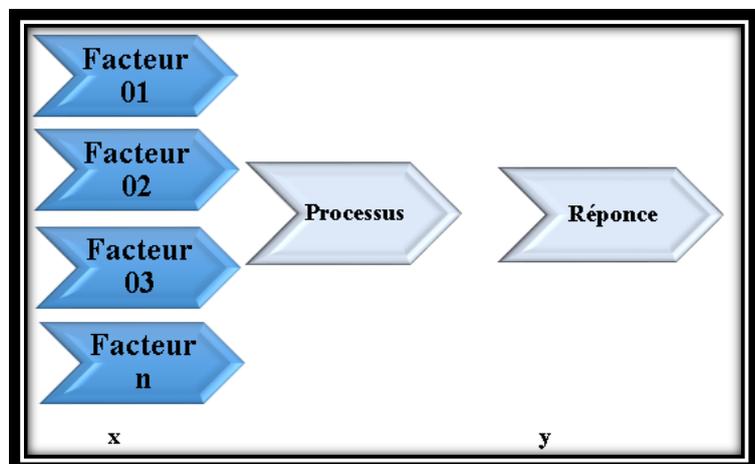
Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [60]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

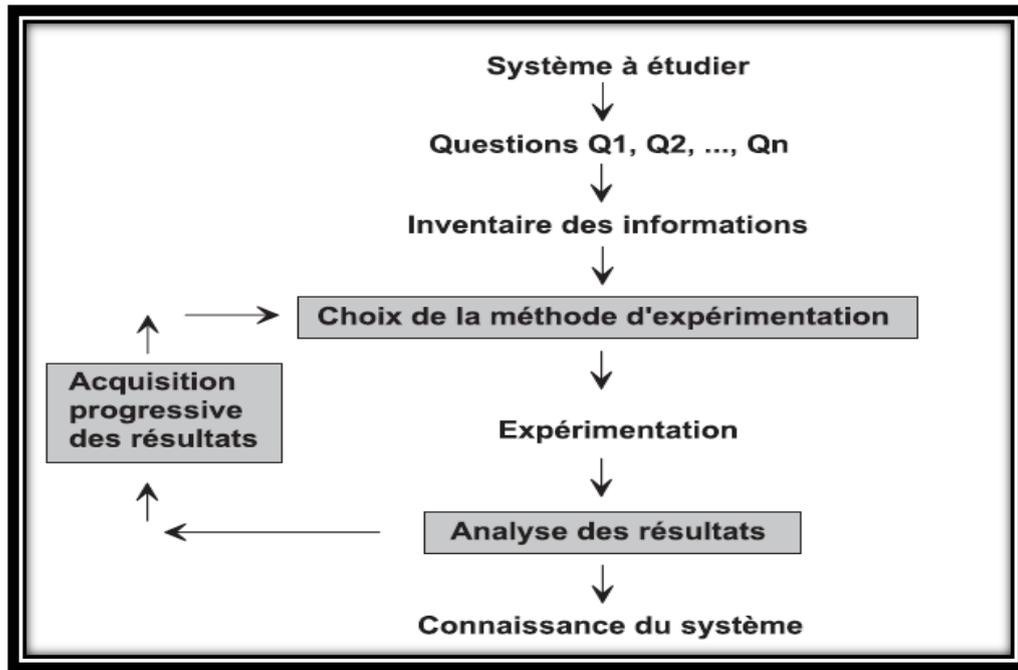
La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

### II.2.2. Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres (facteurs) tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques. Le diagramme résume de manière plus simple cette définition [61].

Figure II.2.1 : vocabulaire d'un plan d'expérience [64].





*Figure II.2.2 : Les plans d'expériences optimisent les trois parties encadrées du processus d'acquisition des connaissances [61].*

### II.2.3. Démarche méthodologique

Le schéma ci-après (**Figure II.2.3**) présente un organigramme général de traitement des plans d'expériences [62].

### II.2.4. 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 [63].

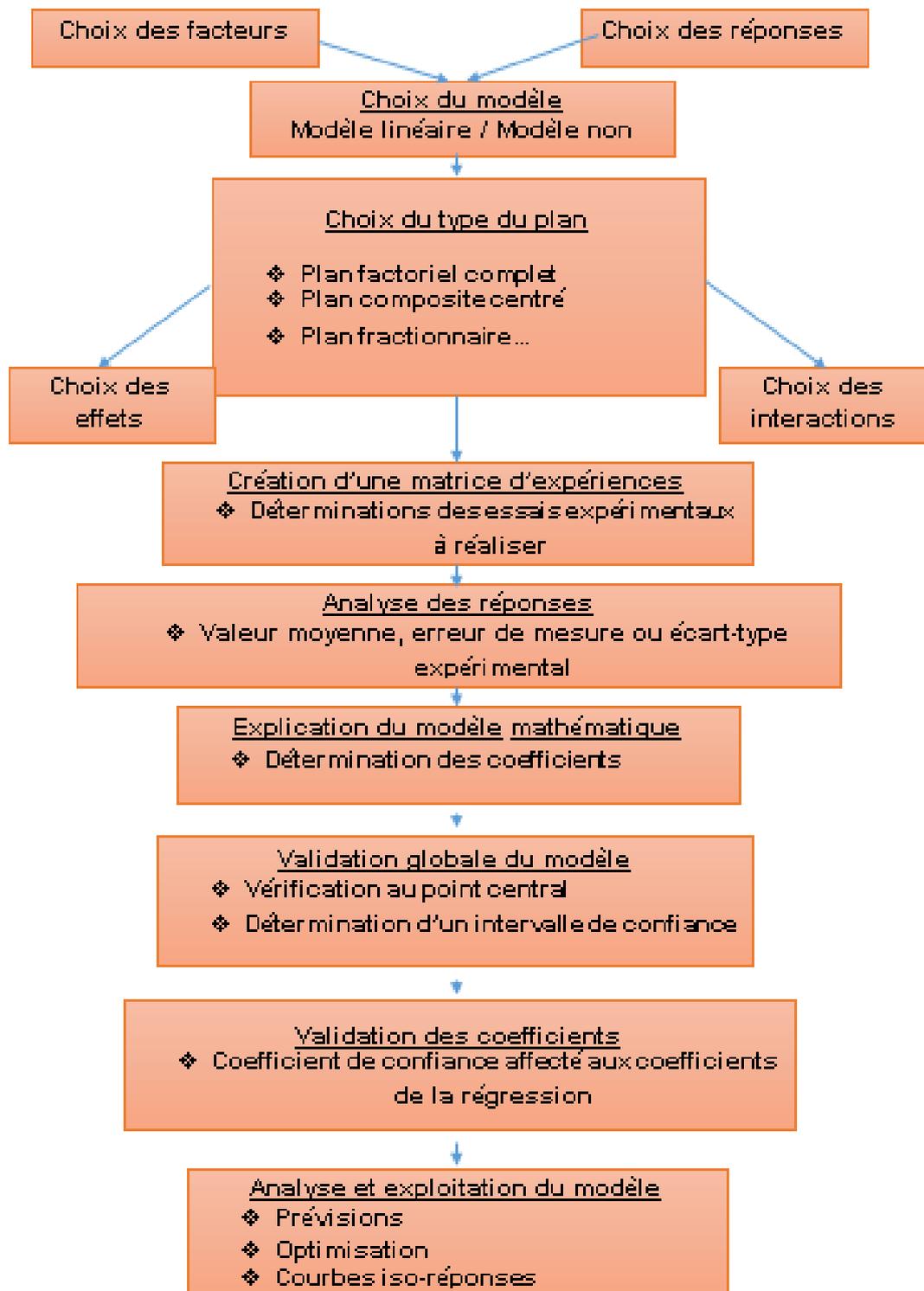


Figure II.2.3 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [65]

### ***II.2.5. Conditions d'application des plans d'expériences***

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat. Leurs applications au béton s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais et la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple, enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées [63] :

#### **Condition 1 :**

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

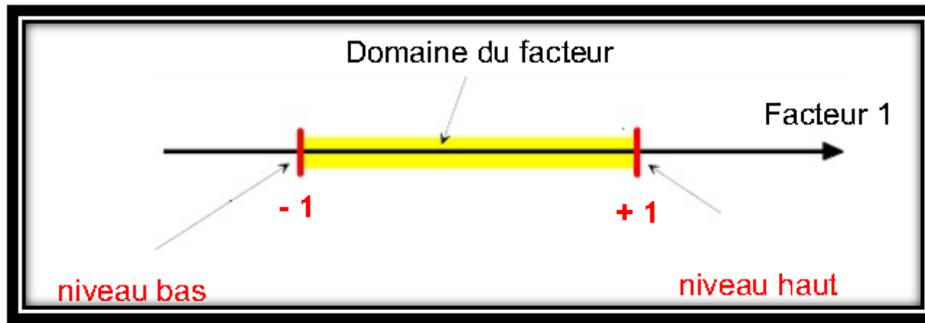
#### **Condition 2 :**

La réponse doit être homoscedastique. Cela signifie que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

### ***II.2.6.1. 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 d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure **II.2.4**). 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.

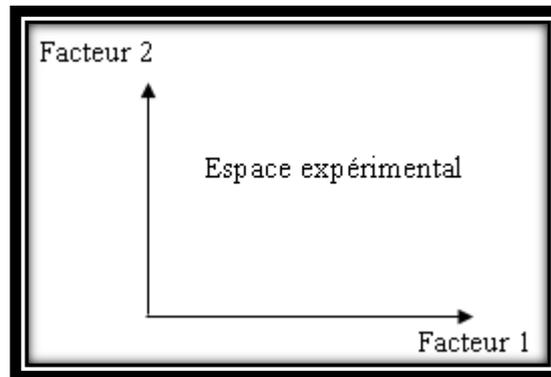
[62]



*Figure II.2.4 : 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. [62]*

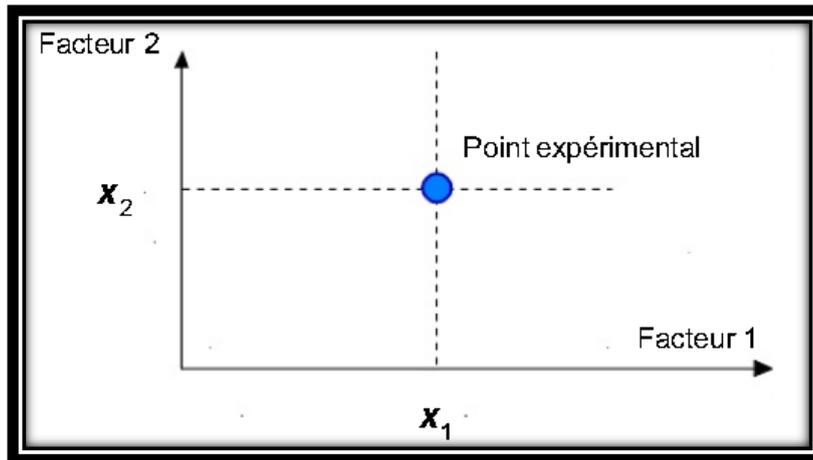
L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par  $-1$  et le niveau haut par  $+1$ .

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. 2.5).



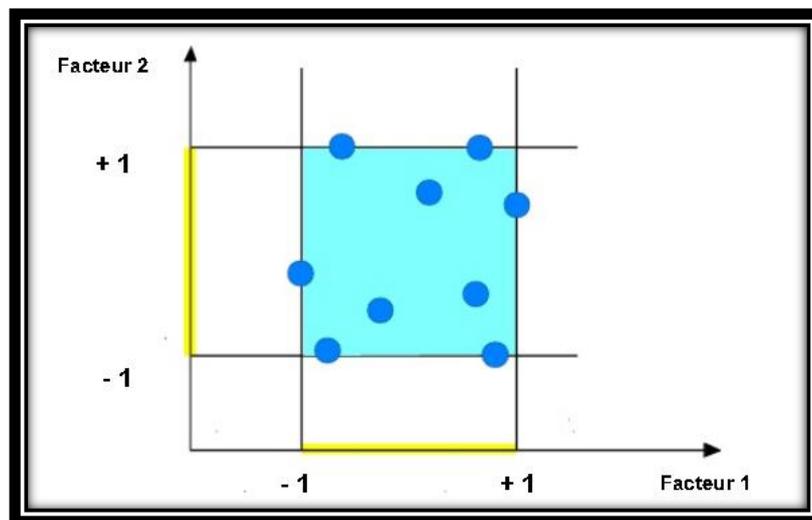
*Figure II.2.5 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental. [62]*

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 .2.6). 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.2.6 : Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux [62].*

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



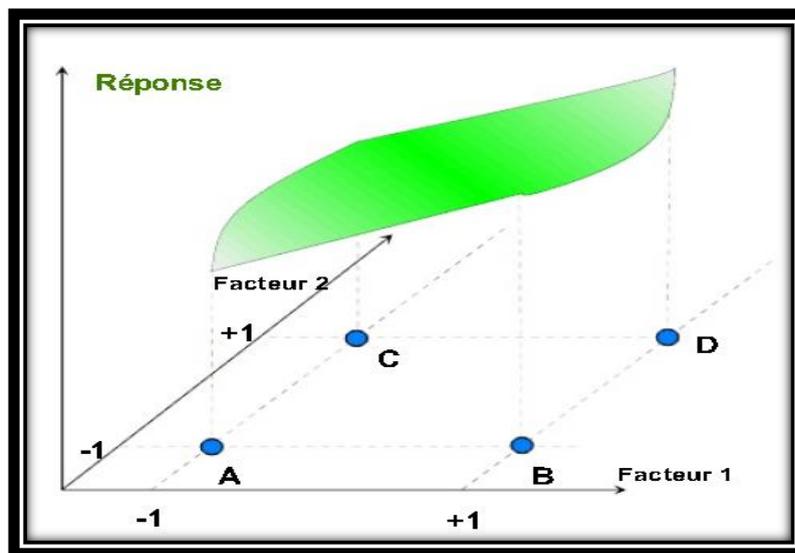
*Figure II.2.7 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur. [62]*

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les

grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers. [62]

### II.2.6.2. Notion de surface de réponse

Les niveaux  $x_i$  représentent les coordonnées d'un point expérimental et  $y$  est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (**Figure II.2.8**). Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.



*Figure II.2.8 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses [62].*

### II.2.7. Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z$$

Où

- $y$  est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- $x_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$  par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori" [62]

### II.2.8. Le modèle de l'expérimentateur

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit. Le premier complément est le "manque d'ajustement". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (lack of fit en anglais). Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales. Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, noté "e". [62]

Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e$$

### ***II.2.9. Méthodologie des plans d'expériences***

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

#### ***II.2.9.1. 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 ont 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.2.9.2. 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

#### ***II.2.9.3. 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 [64].

### ***II.2.10. Différents types de plans d'expériences***

Trois grandes familles de plans d'expériences sont présentes :

#### ***II.2.10.1. Plans factoriels complets à deux niveaux***

Ces plans permettent l'étude de k facteurs à raison de deux niveaux (-1, +1) par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des k facteurs à leurs deux niveaux.

Pour étudier  $k$  facteurs, sur la base des plans factoriels à deux niveaux, il faut réaliser  $2^k$  essais, d'où le nom de plans  $2^k$  donné à cette famille de plans.

La matrice des essais comporte  $k$  colonnes et  $2^k$  lignes. Elle se construit de la façon suivante :

- Colonne du 1er facteur : alternance de -1 et +1.
- Colonne du 2ème facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3ème facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4

Le domaine expérimental est présenté dans l'espace des facteurs à  $k$  dimensions. Les points expérimentaux sont situés aux sommets du polyèdre [68]

### II.2.10.2. Plans fractionnaires à deux niveaux

Les plans fractionnaires à deux niveaux sont des plans optimaux, permettant de réduire la charge expérimentale, proposée par un plan factoriel complet, en focalisant sur les effets les plus intéressants.

Un plan factoriel complet comporte  $2^k$  essais et permet d'estimer, non seulement les effets des facteurs, mais aussi toutes leurs interactions possibles. De ce fait, on est toujours amenées à faire plus d'essais pour collecter moins d'informations car les interactions d'ordre supérieur ou égal à 2 sont négligeables et ne peuvent rien nous apporter.

La solution proposée par les plans fractionnaires consiste à utiliser pour l'étude de  $k$  facteurs les matrices des effets des plans complets  $2^{k-p}$ . L'avantage de ces plans est évident : la charge expérimentale est divisée par  $2^p$  par rapport aux premiers plans,  $p$  est le nombre de facteurs aléatoires « confondus » délibérément, c'est-à-dire qui ont des niveaux de même alternance dans la matrice des expériences [64].

### II.2.10.3. Plans de mélange

La démarche générale des plans de mélange consiste à traduire la variation d'une réponse en fonction des constituants du mélange par la relation  $Y=f(x_i)$  avec  $X_i$  et  $i$  varie entre 1 et  $k$  (le nombre total de facteurs) [64].

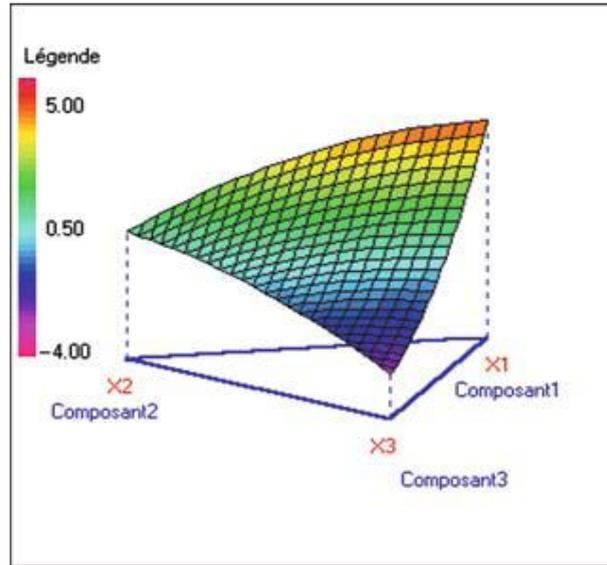
#### II.2.10.3.1. Modèles représentatifs d'un mélange

Pour traduire les variations d'une réponse en fonction de la composition du mélange, il existe plusieurs modèles, à savoir le modèle linéaire, le modèle quadratique, le modèle spécial cubique...

Pour élaborer un tel modèle de degré  $n$  avec  $k$  constituants, le réseau Scheffé ( $k.n$ ) propose de choisir les teneurs en  $X_i$  du mélange suivant la série  $0, 1/m, 2/n \dots /in$  ; ainsi on aura autant de mélanges différents que de coefficients à déterminer dans le modèle polynomial.

- Modèle quadratique (*Figure II.2.9*)

C'est un modèle de degré 2. Sa forme générale est :  $Y = a_i X_i + a_{ij} (j > i)$



*Figure II.2.9 Modélisation par un polynôme d'ordre deux [64].*

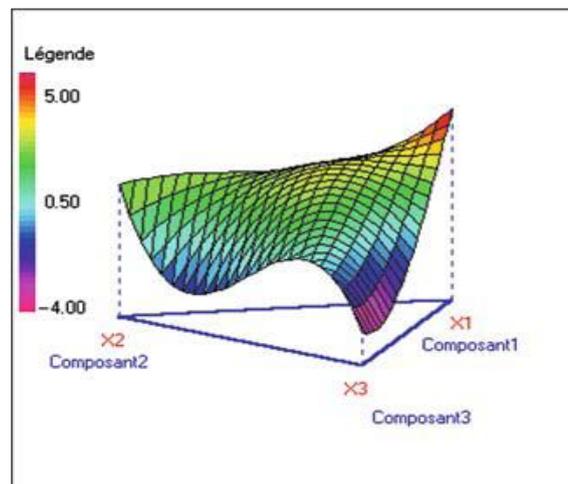
Dans le cas du mélange ternaire on a

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3$$

Ce modèle est dicté par un réseau Scheffé (3,2) constitué par six points aux sommets et aux milieux des arrêts du triangle. Pour tester la validité de ce modèle, on a recours à faire quatre essais situés dans les barycentres des sous triangles ainsi formés (*Figure II.2.10*).

*Figure II.2.10*

*Modélisation par un polynôme d'ordre trois [64].*



### II.2.10.3.2. Différents types de mélanges

Les plans de mélanges permettent le choix des mélanges à tester de façon à pouvoir mieux estimer les coefficients  $a_i$ ,  $a_{ij}$  et  $a_{ijh}$ . Ce sont des plans optimaux

Ces plans sont distingués selon les contraintes auxquelles sont soumises leurs différentes composantes  $X_i$  :

- **-Plan de mélange type I** : dans ce plan, on note qu'il n'y a pas de contrainte particulière.
- **Plan de mélange de type II** : est tel que  $X_i \leq 1$ . Ses contraintes sont fréquemment rencontrées. Si aucune contrainte n'est signalée sur une composition, il y a toujours la contrainte naturelle  $X_i \geq 0$ .
- **Plan de mélange de type III** : est tel que  $l_i X_i \leq u_i$ , ce sont les plus fréquents et les plus difficiles à utiliser
- **Plan de mélange type IV** : où  $X_i (i=2...k) \ll X_1$  où  $X_1$  est le solvant. C'est un cas très particulier de solutions.

### II.2.11. Outils de calcul

Parmi les outils mathématiques et statistiques utilisés pour l'estimation des coefficients des modèles ainsi que leur test, on trouve la régression linéaire. Pour étudier cet outil on s'intéresse aux modèles linéaires, et on réalise  $n$  essais. Si le modèle est polynomial, les résultats de la régression sont applicables en posant :  $X_3=X_1^2$ ,  $X_4=X_2^2$ ,  $X_5=X_1 X_2$ ... [65]

Il est à noter que les différents types de plans d'expériences ainsi que toutes les méthodes et tous les tests, sont informatisés et présentés dans un logiciel « JMP-Minitab-Statistica - Nemrodw -Design-Expert » qu'on a utilisé pour faire le traitement statistique de nos résultats.

### II.2.12. Présentation de logiciel « Design-Expert »

Pour la construction et l'analyse des plans d'expériences on se dispose de plusieurs supports informatiques telque le logiciel : JMP-Minitab- Statistica-Nemrodw - Design-Expert. Le logiciel utilisé pour la réalisation de cette étude est le **logiciel JMP**.

Le logiciel JMP est un logiciel de statistiques dans lequel une partie est consacrée aux plans d'expériences.

Ce logiciel d'analyse de données est utilisé par plusieurs centaines de milliers d'explorateurs de données à travers le monde. Son approche interactive et visuelle lui permet de révéler des informations impossibles à déceler dans les tableaux de chiffres bruts ou de simples graphiques statiques.

L'exploitation des données se fait plus efficacement grâce à de puissantes fonctions statistiques.

Ce logiciel constitue une aide à la conception de stratégies expérimentales optimales.

Il Permet la construction des plans d'expériences et l'analyse des résultats des expériences. Il s'adapte à tous types de problèmes afin de répondre précisément à nos objectifs tout en tenant compte des contraintes expérimentales.

Pour le traitement du plan d'expériences, le logiciel JMP met à notre disposition des outils d'analyse et des indicateurs statistiques spécifiques de l'objectif poursuivi.

On peut sauvegarder les tableaux et graphiques qui nous intéressent dans un fichier compatible avec la plupart des traitements de texte.

JMP offre des fonctionnalités intuitives d'exception pour l'analyse et la conception de plans d'expériences.

JMP rationalise les processus d'analyse et de création de modèle ; il est donc facile d'observer la configuration de réponse, d'identifier les facteurs actifs et d'optimiser les réponses en conséquence.

## ***II.8 Conclusion***

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Leur méthode consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences. Elle amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation.



## **CHPITRE III**

**CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

## CHAPITRE III

### CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

#### III.1 Introduction

La formulation d'un BAP requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, et l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

L'étape de formulation consiste à choisir une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

**Il reste à noter que les conditions sanitaires dues au covid-19, nous ont empêchés de mener le programme des essais réglé pour cette étude.**

De ce fait, nous présentons dans ce chapitre les différentes qualités et caractéristiques des matériaux utilisés, pour la confection et la formulation du béton autoplaçant, mais d'une étude précédente réalisée par Megueddem K. et Thabti K. [1].

Elles ont exécuté les essais au laboratoire de génie civil à l'université de Bordj Bou Arreridj.



**Nous avons exploité leurs résultats.**

#### III.1 Les matériaux utilisés

- ❖ Le sable à l'origine siliceux provenant d'Oued Souf.
- ❖ Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) l'origine carrière<< Mechri BBA>>
- ❖ Ciment CPJ 42.5 provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa « M'sila »
- ❖ L'adjuvant MEDAFLOW 30 (super plastifiant) provenant de Granitex D'Alger.
- ❖ Les additions minérales : le filler Calcaire (SSB 8000 cm<sup>2</sup>/g) provenant de la carrière de Constantine et la poudre céramique blanche (SSB 6000 cm<sup>2</sup>/g) acquis à partir du broyage de leurs déchets dans la cimenterie **d'Ain EL-kebira Sétif**.
- ❖ L'eau de gâchage et conservation : eau potable fournie.

#### III.2 Caractéristiques du sable utilisé

##### III.2.1 Essai d'analyse granulométrique : [NF EN P18-650]

L'analyse granulométrique nous permet d'identifier un matériau, les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

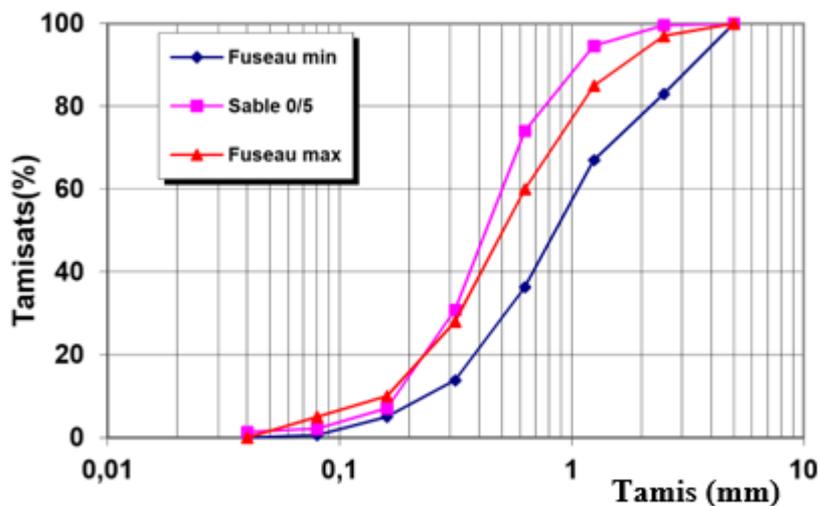
L'analyse granulométrique permet aussi, de déterminer la grosseur minimale « d » et la grosseur maximale « D » des matériaux entrant dans la composition du béton, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux utilisés pour l'analyse qui nous permet de calculer aussi le module de finesse du matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.1 Analyse granulométrique de sable**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
3.15	0	0	0	100
2,5	4	4	0.4	99.6
1,25	50	54	5.4	94.6
0,63	205.5	259.5	25.95	74.05
0,315	432.5	692	69.20	30.8
0.16	237.5	929.5	92.95	7.05
0,08	49	979	97.90	2.1
Fond	7.5	986.5	98.65	1.35



**Figure III.1 Courbe granulométrique du sable Oued Souf**

### III.2.1.1. Module de finesse : [NF EN P 18-304]

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumules des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 3.15mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :  $M_f = \sum R_c / 100$  où :  $R_c$  est le refus cumulé.

Les normes soviétiques spécifient le  $M_f$  des sables comme suit :

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

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

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

$M_f = 1.94$ . Donc le sable utilisé est considéré comme **un sable fin**.

### III.2.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé

#### III.2.2.1 Masse spécifique (absolue) : [NF EN P 18-555]

Pour étudier la formulation d'un béton, il est plus évident de travailler avec les quantités de composants d'après leur masse plutôt qu'avec leur volume.

#### Mode opératoire :

La masse volumique absolue du sable est déterminée à l'aide d'un récipient de 100 cm<sup>3</sup> on prend 3 échantillons de masse de 300g.

**Tableau III.3 : La masse absolue de sable**

Essais	M (gr)	Ve (ml)	V (ml)	P (Kg/l)
1	300	400	515	<b>2.513</b>
2	300	400	520	
3	300	400	519	

### III.2.2.2 Masse volumique apparente [NF EN P 18-555]

#### Masse volumique à l'état lâche

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 1 litres.
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide de capacité de 0.1l, soit  $M_1$  ce poids.
- En place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit  $M_2$  ce poids

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\gamma_{app} = (M_2 - M_1) / V_R \quad (V_R = \text{volume de récipient})$$

Tableau III.4 : La masse volumique apparente de sable

N ° d'essai	M (gr)	V (ml)	$\rho_{app}$ (kg/l)	$\rho_{app}$ (kg/l)
1	1617	1000	1.617	1.62
2	1619		1.619	
3	1615		1.41	

### III.2.2.3 Porosité et compacité et indice des vides [NF EN P- 554]

Pour le sable d'Oued Souf, les valeurs sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.5 : Porosité, compacité et indice des vides.

Porosité (%)	La compacité (%)	L'indice de vide
$P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100\%$	$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	$E = \frac{P}{C}$
35.65	64.35	0.55

**III.2.2.4 Equivalent de sable [NF EN 18-598]**

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment + flocculant (**h1**) et du sédiment (**h2**).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

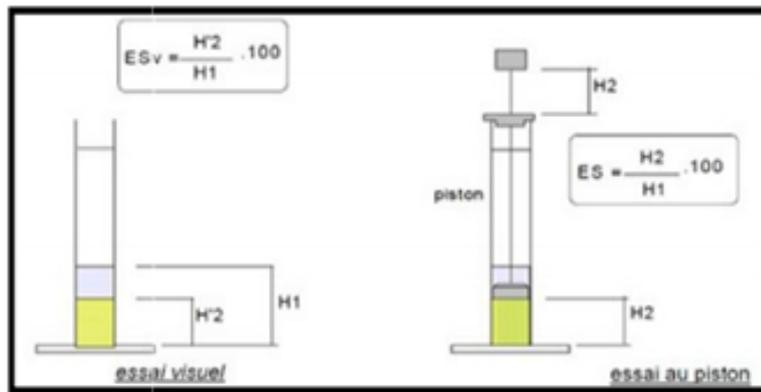
$$ES = \frac{h}{h} \times 100\%$$

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

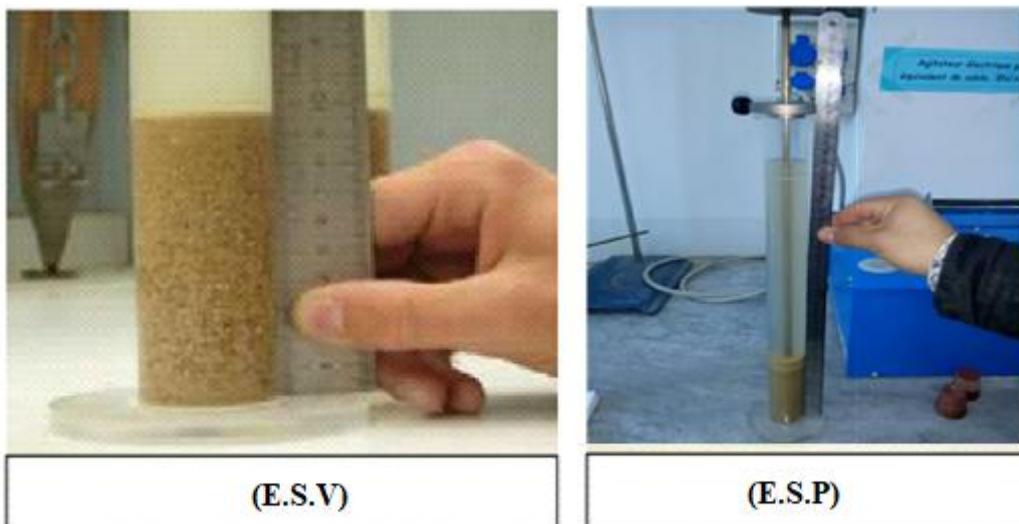
Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur  $h_1$  du niveau supérieur du flocculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.

Mesurer également avec le régllet la hauteur  $h_2$  comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On a  $E.S.V = (h_2 / h_1) * 100 (\%)$  avec  $h_2$  : la hauteur du sable



**Figure III.2 : Essais d'équivalent de sable.**



**Figure III.2.1: Essais équivalent de sable exécutés au laboratoire.**

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

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit  $h_2'$  la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$E.S.P = (h_2'/h_1) * 100(\%)$  Où :  $h_1$  : la hauteur du sable + flocculat       $h_2'$  : la hauteur du sable

**Tableau III.6 : Équivalent de sable**

Essais	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	E.S.V(%)	$h_2'$ (cm)	E.S.P(%)
1	10.8	8.8	88	8.5	85.07
2	9.6	8.6	89.58	8.4	87.5
<b>C'est un sable très propre</b>			(E.S.V) moy <b>88.79 %</b>		(E.S.P) moy <b>86.25 %</b>

**Tableau III.7 : La classification de la nature du sable en fonction d'ES**

E.S.V (%)	E.S.P (%)	Nature et qualité du sable
<b>E.S &lt; 65</b>	E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
<b>65 &lt; E.S &lt; 75</b>	65 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
<b>75 &lt; E.S &lt; 85</b>	70 < E.S < 80	Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
<b>E.S &gt; 85</b>	E.S > 80	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuses risque d'entraîner d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

### III.2.3 Caractéristique chimique du sable :

La composition chimique de sable est établie en mars 2017, à la cimenterie Lafarge (M'sila). (Tableau III.8).

*Tableau III.8 Composition chimique de sable*

Symboles	Teneur en (%)	Symboles	Teneur en (%)
SiO <sub>2</sub>	92.96	Cl	0.331
CaO	0.79	Na <sub>2</sub> O	0.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.039	MgO	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.21	K <sub>2</sub> O	1.16
SO <sub>3</sub>	0.15		

**Commentaire :** Notre sable est un sable pur à haute teneur en silice.

## III.3 Caractéristique du gravier utilisé

### III.3.1 Origine du gravier utilisé

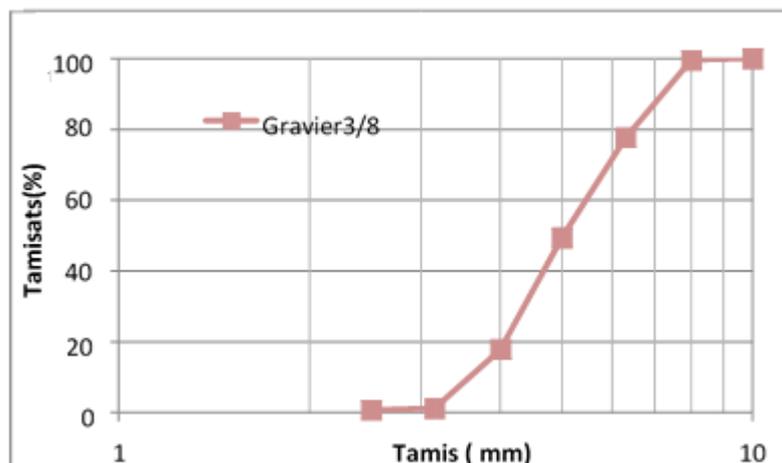
Notre gravier utilisé pour la confection du béton est obtenu par concassage de la roche.

Les fractions des graviers utilisés sont : la fraction 3/8 et la fraction 8/16 **III.3.2**

**Analyse granulométrique :** identique que celui du sable

Fraction 3/8 avec  $M_{G3/8}=1.6$  kg (*Figure III.4*)

Fraction 8/16 avec  $M_{G8/16}=3.2$  Kg (*Figure III.5*)



*Figure III.4 Courbe granulométrique du gravier 3/8*

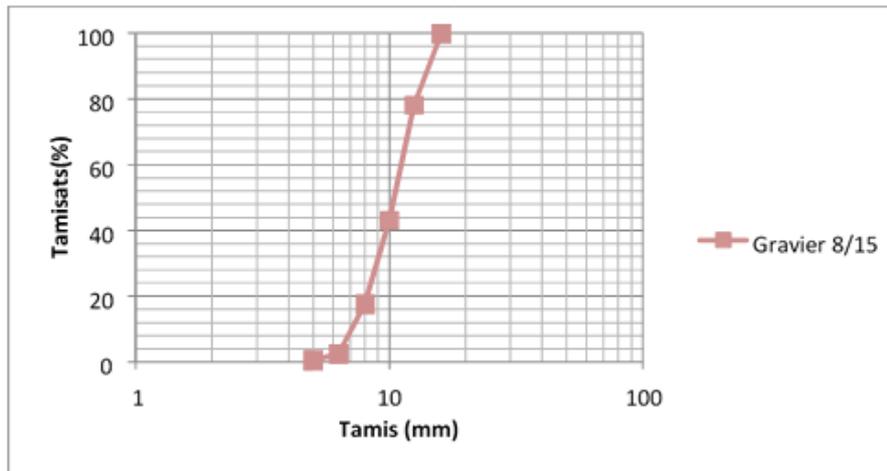


Figure III.5 Courbe granulométrique du gravier 8/16

### III.3.3 Les caractéristiques physiques des graviers utilisés

#### III.3.3.1 Masse volumique apparente : [NF EN P18-554]

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

##### Mode opératoire :

Verser le granulat dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par couches horizontales successives. Puis Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une règlette.

La masse volumique est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Où :

V : volume du récipient

M<sub>2</sub> : poids de l'ensemble (granulat + récipient)

M<sub>1</sub> : poids de récipient

Tableau III.11 : Masse volumique apparente du gravier

Essais G8/16	M <sub>1</sub> (Kg)	V(L)	γ (kg/l)	γ <sub>moy</sub> (kg/L)
1	14.627	10	1.462	1.462
2	14.515	10	1.451	
3	14.753	10	1.475	
1	7.1325	5	1.427	1.425
2	7.117	5	1.423	
3	7.137	5	1.427	

**III.3.3.2 Masse volumique absolue**

Le mode opératoire est le même que pour le sable, et les résultats sont regroupés dans le Tableau III.13.

*Tableau III.12 : La masse volumique absolue du gravier*

Gravier	Essais	M(g)	V <sub>e</sub> (cm)	V (cm)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>moy</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
3/8	1	300	400	520	2.50	2.64
	2	300	400	510	2.72	
	3	300	400	511	2.70	
8/16	1	300	400	510	2.73	2.67
	2	300	400	515	2.60	
	3	300	400	512	2.68	

**III.3.3.3 Compacité, porosité et l'indice de vide : [NF EN P 18-554]**

Le mode opératoire est semblable à celui effectué pour le sable et les résultats sont comme suit :

*Tableau III.13 : Porosité, compacité et l'indice des vides*

Fraction du gravier	Porosité	Compacité	L'indice des vides E
	P(%)	C(%)	
	$P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100\%$	$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} = 1 - P$	$E = \frac{P}{C}$
3/8	44.64	55.36	0.80
8/16	46.62	53.38	0.87

Tableau III.14 : l'absorption d'eau de gravier

La masse (g)	La masse sèche (g)	Absorption(%)
1000	995	0.5
1000	996	0.4

### III.3.4 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés

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

#### III.3.4.1 Essai Los Angeles [NF EN P18-573]

Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat.

##### Principe de l'essai

Le principe consiste à mesurer la quantité d'éléments passant à travers un tamis de 1.6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans la machine « Los Angeles », le nombre de boulets est 11, soit environ une masse totale des boulets égale à 5000g

Si **M** est la masse du matériau soumis à l'essai, **m** la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$L_A = (m/M) * 100$$



Figure III.7: Appareil de l'essai Los Angeles

##### Mode opératoire :

- Tamisage de l'échantillon à sec.
- Lavage de du matériau et son séchage à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante.
- La masse de la prise d'échantillon pour essai est de 5000 g.

- Introduction avec précaution la charge de boulets correspondant de la classe granulaire choisie au nombre de 11, puis l'échantillon pour l'essai.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à vitesse régulière (30 tr /mn)
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau 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, pesé ce refus une fois séché, soit, **m'** le résultat de la pesée.

Où :  $m = 5000 - m'$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

**Tableau III.15 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé**

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	Coefficient de los Angeles L <sub>A</sub> (%)
8/16	5	3.371	32.58

**Classification :**

Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

**Tableau III.16 : Classification des roches en fonction du coefficient L<sub>A</sub>**

Coefficient L <sub>A</sub>	Nature de los Angeles L <sub>A</sub>
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
<50	Très tendre

**Commentaire :**

Le gravier (8/16) : c'est un gravier **Mis dure** ( $L_A=32.58\%$ ) (30 à 40), se trouve dans l'intervalle des graviers admissible.

**III.5 Ciment**

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe 42.5 provient de la cimenterie de Lafarge de M'sila.

**III.5.1 Caractéristiques du ciment CEM II/B 42,5****III.5.1.2 Caractéristiques physiques du ciment utilisé EN 196-1, (2002)****Tableau III 17 : Caractéristiques physiques du CEM II/B 42,5.**

Les caractéristiques physiques		Unité	Valeur
Masse volumique absolue		g/% <sup>H</sup>	3,1
Consistance normale		%	26-28
La finesse (Blaine)		% [ /g	4000-4200
Le Chatelier	A froid	Mm	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	Min	2 :30
	Fin		3.30
Résistance à la compression	2 jours	Mpa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

**III.5.1.3 Caractérisation chimique et minéralogiques du ciment utilisé (CEM II/B 42.5)****Tableau III.18 Les compositions chimiques du CEM II/B 42.5**

Oxyde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Teneur	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau III.19 Les compositions minéralogiques du ciment CEM II/B 42.5

Eléments	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Teneur (%)	59	14	6	100

### III.6. Le Filler calcaire

L'addition calcaire provient de la carrière de Constantine.

**III.6.1 Caractéristiques physiques et chimiques du calcaire** : issues à partir des essais au laboratoire de la cimenterie d'Ain Lkbira à Sétif

Tableau III.20: La composition chimique et les propriétés physiques du filler calcaire

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
CaO	57,60	Densité absolue	2.80	g/cm <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	Densité apparente	0.86	g/cm <sup>3</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	S.S.B	8000	cm <sup>2</sup> /g
SiO <sub>2</sub>	0,13	D <sub>10</sub>	1.1	µm
Mgo	0,13	D <sub>50</sub>	4.06	µm
Na <sub>2</sub> O	0,06	D <sub>90</sub>	28.67	µm
K <sub>2</sub> O cl	0.00	I <sub>28</sub>	0.74	/
	0,002	I <sub>90</sub>	0.76	/
SO <sub>3</sub>	0,02			
P-A-F (1000°C)	41,98			

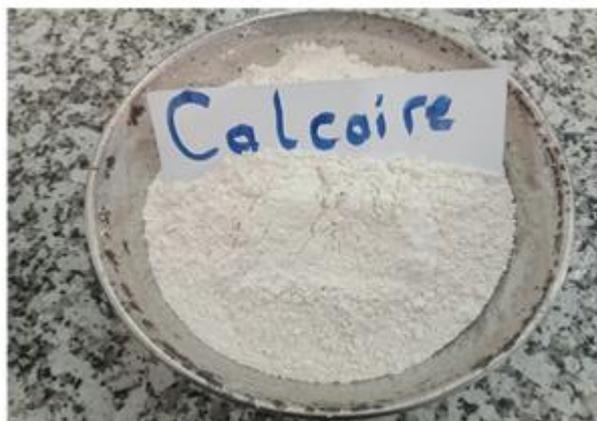


Figure III.8: Poudre de calcaire utilisée

### III.6. Poudre de céramique blanche

L'addition déchet de céramique blanche après broyage :

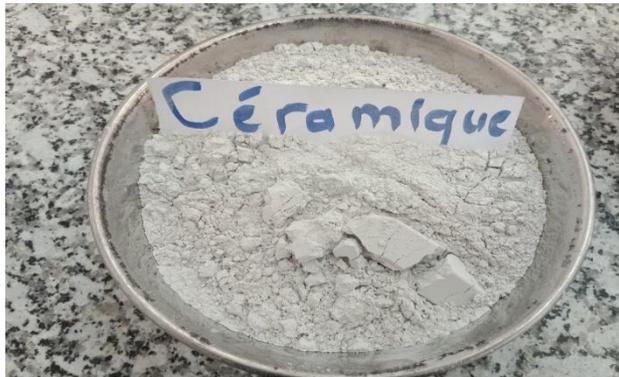


Figure III.9: Poudre de céramique blanche

#### III.6.1 Caractéristique physique et chimique de la céramique

Tableau III.21 : propriétés physiques et chimiques de la poudre de céramique

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Valeurs	Unité
SiO <sub>2</sub>	69.36	Densité absolue	2.60	g/cm <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.50	Densité apparente	0.86	g/cm <sup>3</sup>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.74	S.S.B	6000	cm <sup>2</sup> /g
CaO	1.72			
Mgo	2.73			
SO <sub>3</sub>	0,02			
K <sub>2</sub> O	2.36			
Na <sub>2</sub> O	1.20			
Cl	-0.01			
P-A-F (1000°C)	1.37			

### III.8 Les Adjuvants

Nous avons utilisé un type des adjuvants super plastifiant « **MEDAFLOW 30** » fabriqué par la société Granitex à Oued Smar Alger (**Tableau III.22**).

#### III.8.1 Description

Le « **MEDAFLOW 30** » est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Et permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Tableau III.22 : Caractéristique de l'adjuvant « MEDAFLOW 30 ».

Aspect	Couleur	PH à 20°C	Densité	Chlorure	Extrait sec
Liquide	Brun clair	6 – 6.5	1.07 ±0.01	< 0.1 g/l	30%

### III.8.2 Propriétés

Tableau III.23 : Propriétés de « MEDAFLOW 30 » à l'état frais et durci.

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

### III.9. L'eau de gâchage : [EN 1008]

Nous avons utilisé pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivantes :

Tableau III.24 : Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
Ph	7	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 µs/cm	
Taux de (Cl <sup>-</sup> )	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

### III.10. Formulation de béton auto plaçant par la méthode LCPC

#### III.10.1 Méthode française (LCPC)

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC), ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange,

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante : La proportion de liant est fixée à priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé :

La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante, les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

### III.11. Calcul des constituants d'un BAP

#### ❖ Les données de base :

On a choisi :

- $G/S=0,9$ .
- On fixe le rapport  $E/(C+F)=0,38$ .
- Le dosage de saturation en super plastifiant est 1.2% de la masse de (ciment + filler) déduit à partir de l'essai de mini-cône.

**Tableau III.25 : Dosage de superplastifiant de la masse de (ciment + filler)**

Superplastifiant					
Densité (G sup)	Teneur en Solides (s)(%)	$M_{sec}=c*d/100$	$V_{liq}=M_{sol}*100/s*G_{sup}$	$VE=V_{liq}*G_{sup}*(100-s)/100$	$V_{sol}=V_{liq}-VE$
1.07	30	5.28 Kg/m <sup>3</sup>	16.32 Kg/m <sup>3</sup>	12.22 l/m <sup>3</sup>	4.1 l/m <sup>3</sup>

#### ❖ Composition de la formulation de base du BAP (béton témoin)

Le volume de la pâte pour 1m<sup>3</sup> du BAP égale à

- 400 kg/p<sup>q</sup> du ciment.
- 40 kg/p<sup>q</sup> Ajout (calcaire) (10% du poids de ciment).
- $E/(C+F)=0,38$
- $G/S=0.9$

• **b. Détermination de la masse de chaque constituant**

On a :

✚ C=400 kg/p<sup>q</sup>.

✚ Calcaire =40 kg/p<sup>q</sup>

✚ E/(C+F) =0,38 donc E=0,38x (400+40) E= 167.2 l/m

✚ Le volume de la pâte : V<sub>Pâte</sub> =304.906 l/m<sup>3</sup>

Sachant que : V<sub>total</sub> = V<sub>air</sub>+V<sub>G</sub>+V<sub>Pâte</sub>, on aura donc V<sub>G</sub>=670.093 l/m<sup>3</sup>

D'une autre part, on a G+S=670.094 l où : G est le volume du gravier et S est le volume de sable. Donc G=670.0931-S et G/S = 0.9 alors G= 0.9S

0.9S+S=670.094 d'où on trouve S = 352.681 l/m<sup>3</sup> et G=317.4120 l/m

✚ Le dosage en super plastifiant est 1.2% de la masse ciment et filler SP=0.012 (400+40). Donc **SP=5.28kg/m<sup>3</sup>**

L'extrait sec du super plastifiant (poly carboxylate) est de 30%.

Donc la quantité d'eau provenant du super plastifiant

$$VE = \frac{16,32 \times 1,07 \times 70}{100} = 12,22 \text{ l/m}^3$$

Donc la quantité d'eau utilisée par 1m<sup>3</sup> est de 154.98 l/m<sup>3</sup>

On utilise les masses spécifiques des granulats pour déterminer leur dosage en Kg

**Gravier : gravier 3/8** (ρ<sub>abs</sub> = 2,64) **et gravier 8/16** (ρ<sub>abs</sub> = 2,67)

*Tableau III.26 composition d'un mètre cube de BAP formulé par la méthode LCPC*

Constituants	Quantité	Unité
Sable	885.23	kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8 (40%)	335.19	kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/16 ( <b>60%</b> )	508.49	kg/m <sup>3</sup>
Ciment	400	kg/m <sup>3</sup>
Eau	154.98	kg/m <sup>3</sup>
Super plastifiant	16.32	kg/m <sup>3</sup>
filler de calcaire 10%	40	kg/m <sup>3</sup>

### Composition de 36 l de béton formulé par la méthode LCPC

**Béton témoin** : quantité nécessaire de 0.036m<sup>3</sup>

*Tableau III.27 Composition des bétons témoin pour confectionner 36 l en Kg*

Constituants	Quantité	Unité
Sable	31.86	<b>Kg</b>
Gravier 3/8	12	<b>Kg</b>
Gravier 8/16	18.22	<b>Kg</b>
Ciment	14.4	<b>Kg</b>
Eau	5.57	<b>Kg</b>
Super plastifiant	0.598	<b>Kg</b>
filler de calcaire 10%	1.44	<b>Kg</b>

### Composition de 36 l de BAP modifié formulé par la méthode LCPC

Sachant qu'on a ajouté des pourcentages différents de poudre de céramique blanche à 2%, 7% et 14% comme addition à la composition de base citée précédemment, en faisant, en même temps, varier la granulométrie du sable vis-à-vis des particules fines en pourcentages différents. La préparation du sable s'articule sur les pourcentages des différents diamètres déduits à partir de l'analyse granulométrique et ce en se limitant à additionner plus de sable fin (le sable compris entre 0,63 et 0,08 mm), ou au contraire, à le retrancher donc moins de sable fin comme suit :

- Sable1 : faire ajouter 5% des deux fractions composées (2% de 315µm et 3% de 160 µm), par rapport à leur pourcentage granulométrique et retrancher en quantité égale le gros sable (au-delà de 0,63mm) pour garder le même volume dans la formulation du béton,
- Sable2 : faire le même travail avec 7% (3% de 315µm et 4% de 160µm)
- Sable3 : faire retrancher 5% des deux fractions composées (2% de 315 µm et 3% de 160µm), par rapport à leur pourcentage granulométrique et ajouter en quantité égale le gros sable (au-delà de 0,63mm)
- Sable4 : répéter la même opération avec 7% (3% de 315µm et 4% de 160µm)

Dans ce qui suit, on va regrouper les différentes formulations associées pour chaque variante.

**Tableau III.28 composition d'un mètre cube de BAP (10%Ca+2%Céramique) formulé par la méthode LCPC**

Constituants	Quantité	Unité
Sable	874.735	kg/m <sup>3</sup>
Gravier 3/8	331.16	kg/m <sup>3</sup>
Gravier 8/16	502.39	kg/m <sup>3</sup>
Ciment	400	kg/m <sup>3</sup>
Eau	153.62	kg/m <sup>3</sup>
Super plastifiant	16.623	kg/m <sup>3</sup>
filler de calcaire 10%	40	kg/m <sup>3</sup>
Céramique	8	kg/m <sup>3</sup>

**Tableau III.29 Composition des différents bétons pour confection 36 l en Kg**

Constituant	BAP (2%PC)	BAP (7%PC)	BAP (14%PC)
Sable	31.485	30.529	29.17
Gravier 3/8	11.921	11.844	11.05
Gravier 8/16	18.085	17.537	16.758
Ciment	14.4	14.4	14.4
Eau	5.530	5.777	6.803
Super plastifiant	0.597	0.6255	0.736
calcaire 10%	1.44	1.44	1.44
Céramique	0.288	1	2.016

### **III.12 Procédure de fabrication des éprouvettes**

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad el Bachir El Ibrahim et les tests sont effectués au même laboratoire. La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant, on suit le mode opératoire suivant :

- ✓ Vérifier le nombre et l'état des moules cylindrique et cubique nécessaires pour les essais, ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage
- ✓ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- ✓ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- ✓ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée, le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- ✓ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, poudre de céramique, filière de calcaire) et les introduire dans le malaxeur.
- ✓ La fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe vertical de capacité **40L** un mode opératoire strict et identique est suivi :
- ✓ Brassage à sec du mélange sable + Gravier + ciment + poudre de céramique + filière de **calcaire**) pendant **30s**.
- ✓ Ajout de l'eau + super plastifiant **210 s**.
- ✓ Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- ✓ Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton auto plaçant.



*Figure III.10 : Malaxeur à béton laboratoire de GC.*

### ***III.13 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état frais***

Les essais proposés par L'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

### **III.13.1 Essai au mini-cône (NF EN 1961)**

- **Le but de l'essai**

C'est un essai qui nous permet d'avoir l'état de saturation de tel ciment en présence d'un adjuvant fluidifiant ou super plastifiant, afin de déterminer le rapport E/L qui convient.

- **Le principe de l'essai**

L'essai consiste à la caractérisation de la pâte du ciment à l'état frais, un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque plane horizontale en fonction des paramètres de composition, ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement. Le principal avantage de cet essai consiste dans la facilité et la rapidité d'exécution puisqu'il ne nécessite qu'une faible quantité de matériaux (volume inférieur à 40 ml et la Masse de liant égale à 220 g).

### **III.13.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams [NFEN12 350-8]**

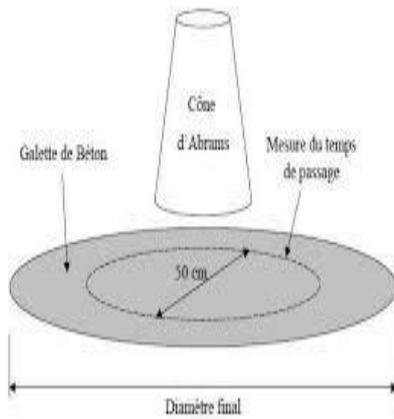
La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow), des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP.

**Matériel nécessaire :**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) Constituant un carré d'au moins 90 cm de coté
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm.

**Mode opératoire :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer le diamètre de la galette et noter le résultat.



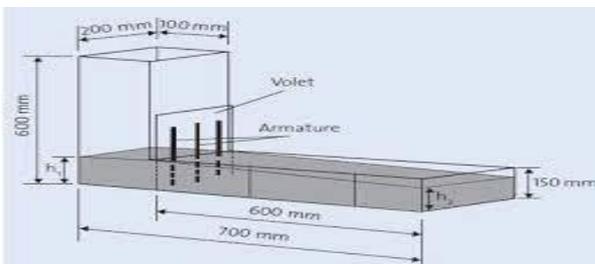
**Figure III.11 : Essai au cône d'Abrams**

### **III.13.3 Essai de la boîte en « L » : [NF EN 12 350-10]**

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné (**figure III.12**) et de vérifier la mise en place du béton et de s'assurer qu'il ne sera pas contrarié par des phénomènes de blocage inacceptables.

Mode opératoire :

- Prélever un échantillon de béton représentatif ;
- Remplir entièrement la partie verticale de la boîte en béton en déversant de manière continue (le volume nécessaire est d'environ 13 litres) ;
- Après arasement, laisser le béton reposer pendant une minute ;
- Soulever la trappe verticalement.
- Laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H_2 / H_1$



**Figure III.12 : Essai de boit en L.**

### **III.13.4 Essai de stabilité au tamis : [NF EN 12 350-11]**

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité du béton livré sur chantier.

**Matériel utilisé :**

- Seau de 10 L + couvercle
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond
- Bascule : précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg

**Mode opératoire:**

- Prélever un échantillon de béton de 10 litres juste après le malaxage ;
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation ; Attendre 15 mn ;
- Peser le fond et le tamis à vide ;
- Peser le fond seul ;
- Poser le tamis + fond sur la balance et faire la tare ;
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire ressuage à la surface du seau après 15 minutes ;
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 kg (tolérance  $\pm 0.2$  kg), verser ce béton au centre du tamis d'une hauteur de chute de 50 cm  $\pm 5$  cm ;
- Noter le poids de l'échantillon ;
- Attendre 2 mn ;
- Peser le fond avec la laitance : on a  $P_{\text{laitance}} = P_{\text{fond+laitance}} - P_{\text{fond}}$  ;
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \cdot 100$$



**Figure III.13 : Essai de stabilité au tamis exécuté au laboratoire**

### III.13.5 Essais de rhéomètre I CAR (mesure seuil de cisaillement et viscosité)

Le rhéomètre est un appareil conçu spécialement pour mesurer les propriétés rhéologiques des fluides, Ils permettent une caractérisation plus complète en termes de viscosité, de plasticité (seuil d'écoulement) et d'élasticité.

#### a-Description de l'appareil :

Le rhéomètre ICAR a été développé par Eric P. Koehler en 2007. Il est composé de 3 parties :

- Un récipient cylindrique d'une hauteur  $H= 30$  cm et d'un diamètre  $D= 30,5$  cm.
- Une pale en acier d'une hauteur  $h= 12,5$  cm et d'un diamètre  $d= 12,5$  cm.
- Un agitateur.

#### b-Procédure d'essai :

- Une fois le récipient est rempli de béton, on émerge la pale dans le récipient et le béton sera cisailé en imposant le profil vitesse.
- L'essai est fait en moins d'une minute.



Figure III.14 : Essais rhéomètre

## III.14 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci

### III.14.1 Essai compression [EN 206-1]

La résistance est déterminée à 28 jours (**Figure III.15**), par la formule :  $R_c = F/S$

**S** : section de l'éprouvette : **100 cm<sup>2</sup>**.

**F** : force au moment de la rupture



*Figure III.15 : Essai compression*

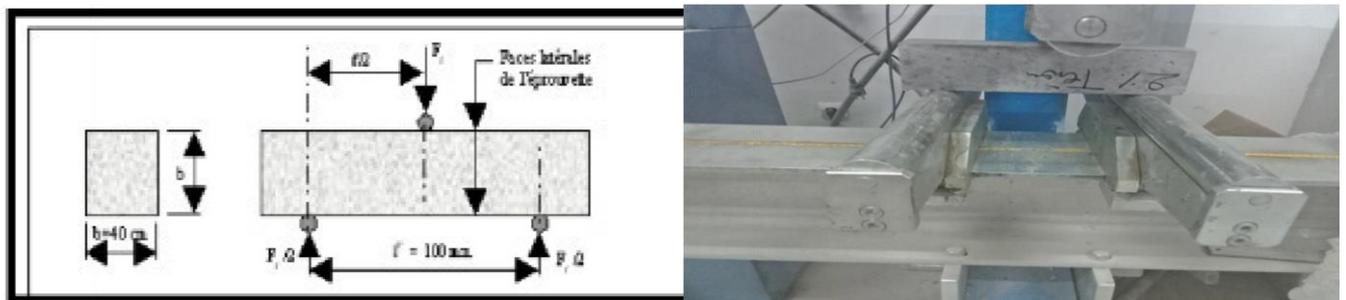
### **III.14.2 Essais traction par flexion : [NF EN P 18-408]**

- **But de l'essai**

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

- **Conduite de l'essai**

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression (dans un rapport de 10) l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction. La contrainte limite qui découle d'un calcul classique de résistance des matériaux en élasticité est  $\sigma_{tf}$  (contrainte de traction par flexion). Le matériau béton n'ayant pas un comportement élastique au voisinage de la rupture, il convient d'apporter au calcul de la résistance en traction du béton  $\sigma_t$  un terme correctif de 0,6 ( $\sigma_t = 0,6 \sigma_{tf}$ ) [27].



*Figure III.16 : Principe de l'essai traction par flexion.*

### ***III.15. Confection des éprouvettes***

#### ***III.15.1 Type et tailles des moules et conservation des éprouvettes***

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme : Cubique (10x10x10 cm), cylindrique (16x32cm) et prismatique (7x7x28)

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24h après le coulage puis conservées sous l'eau à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

### ***III.16 Conclusion***

Le troisième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux locaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler calcaire, poudre de céramique blanche, superplastifiant, sable et gravier.). Pour la confection du béton, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamad EL Bachir Elibrahimi.et, nous avons détaillé tous les essais soit à l'état durci ou frais, 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 est déduite.



# **CHAPITRE IV**

## **EXPOLOITATION ET MODELISATION DES RESULTATS**



## CHAPITRE IV

### EXPLOITATION ET MODELISATION DES RESULTATS

#### *IV.1. Introduction*

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir des essais expérimentaux et l'analyse de chaque modification apportée par les différents ajouts utilisés en fonction de leurs taux d'addition. Afin de bien valoriser les ajouts utilisés, nous avons procédé à la quantification de leurs effets sur la rhéologie, la résistance à la flexion et la résistance à la compression.

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

#### *IV.2. Mise en application des plans d'expériences*

D'abord, Il est à noter que toutes les formulations préparées sont modélisées par le logiciel JMP. Des représentations graphiques simples sont aussi présentées, expliquées et interprétées de façon à déduire l'influence de chaque des constituants suivants sur la performance des BAP traités :

Sable fin (SF), 5 et 7% à additionner ou à retrancher, et poudre de céramique (PC), 7 et 14%.

(Voir la procédure au chapitre III).

##### *IV.2.1. Mise en application du logiciel « JMP »*

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

Nous aurons à traiter un plan de mélange à 2 facteurs : sable fin (SF) et la poudre de céramique (PC), dont la somme est égale à l'unité

Avec deux facteurs et quatre niveaux, le plan de mélange comprenant 8 mélanges pour évaluer l'influence de ces facteurs sur les caractéristiques du BAP .

Les formulations choisi pour en faire la modélisation sont celles de 7% et 14% de PC (valeurs optimales). Le tableau IV.1 récapitule une description des 8 mélanges saisis.

Tableau IV. 1 différents mélanges à analyser

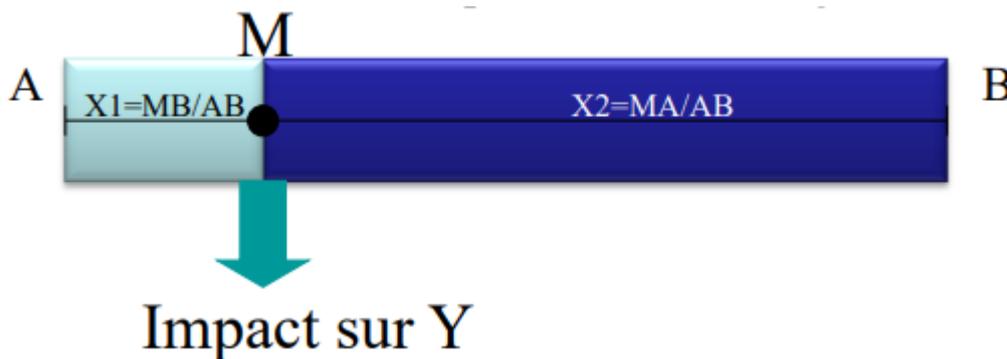
Type de béton			
Avec 7% (PC)		Avec 14% (PC)	
5% (SF)	7% (SF)	5% (SF)	7% (SF)
BAP7%PC+5%SF	BAP7%PC+7%SF	BAP14%PC+5%SF	BAP14%PC+7%SF
BAP7%PC-5%S	BAP7%PC-7%S	BAP14%PC-5%S	BAP14%PC-7%S

IV.2.2. Représentation graphique des mélanges à 2 constituants

Un mélange à k constituants est représenté par un point :

– Avec 2 constituants, k=2 : mélange binaire •  $X_1+X_2=1$  où  $X_1$  est la poudre de céramique (PC) et  $X_2$  est le pourcentage du sable fin à additionner ou à retrancher.

Variations de la composition du mélange :



Le modèle polynomial d’ordre deux a été utilisé à deux variables non indépendants (dosage de sable fin et poudre de céramique) et quatre niveaux. Le modèle est exprimé comme suit :

$$Y = a_1 \times PC + a_2 \times SF + a_3 \times PC.SF + a_4$$

Avec : Y est la réponse et  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$  sont les coefficients du modèle qu’il faut identifier et expriment l’effet de la réponse à chaque facteur et à chaque interaction.

La représentation graphique à deux facteurs sera comme suit :

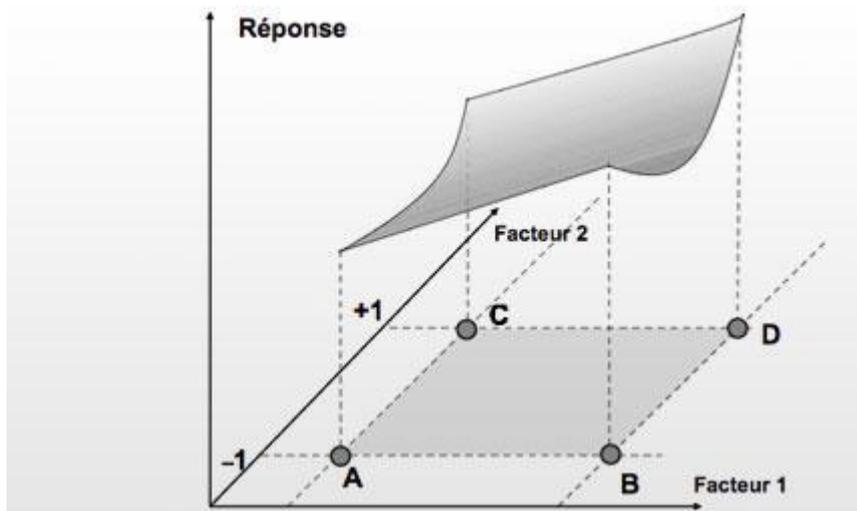


Figure IV.1. Représentation graphique des mélanges à 2 facteurs

### IV.3. Résultats des essais

#### IV.3.1. Résultats des essais à l'état frais

##### a. Les essais de l'étalement

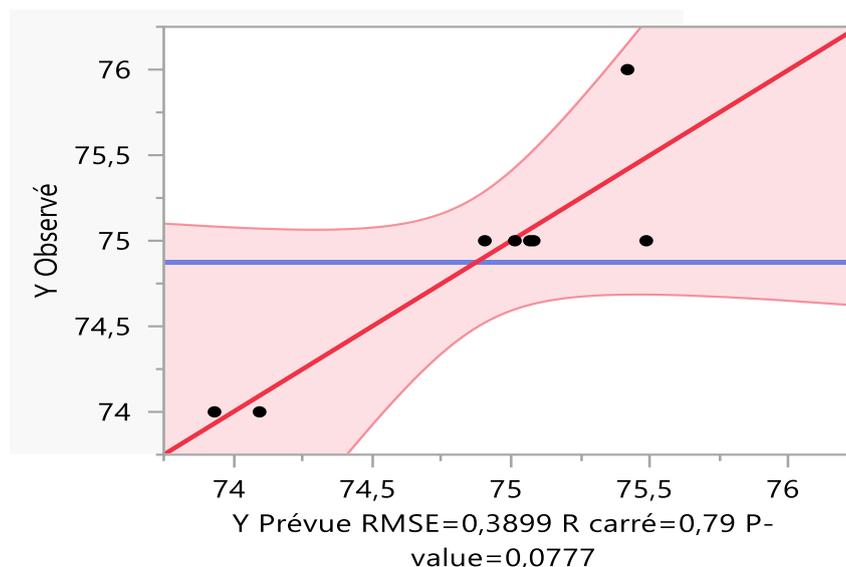
La figure présente les résultats expérimentaux du diamètre d'étalement  $D_E$  [1]

Tableau IV. 2 Résultats de l'essai d'étalement

Type de béton	Diamètre de l'étalement (cm)
<b>BAP7%PC+5%SF</b>	<b>75</b>
<b>BAP7%PC-5%SF</b>	<b>74</b>
<b>BAP7%PC+7%SF</b>	<b>75</b>
<b>BAP7%PC-7%SF</b>	<b>74</b>
<b>BAP14%PC+5%SF</b>	<b>76</b>
<b>BAP14%PC-5%SF</b>	<b>75</b>
<b>BAP14%PC+7%SF</b>	<b>75</b>
<b>BAP14%PC-7%SF</b>	<b>75</b>

On va modéliser ces résultats par le logiciel JMP pour avoir une loi de comportement des BAP.

La relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées est représentée par le graphique :



**Figure IV.2. Graphique des valeurs observées du diamètre de l'étalement ( $D_E$ ) en fonction des valeurs prévues**

Les modèles adaptés ont montré des coefficients de corrélation relativement élevés. Mais malgré cela, la validité doit être vérifiée. Les résultats de l'étalement inclus dans le plan expérimental ont été analysés afin d'estimer l'erreur expérimentale. La valeur moyenne, le coefficient de variation et l'erreur attendue (intervalle de confiance à 95%) est présentée dans le tableau **IV.3**. Les covariances des réponses sont largement satisfaisant. La validation des modèles établis est à nouveau estimée en comparant les prévisions valeurs avec les valeurs de l'étalement obtenues par les chercheurs khans et al. La moyenne du rapport des valeurs prédites aux valeurs mesurées des moyennes ( $r$ ) des réponses  $D_E$  sont 74,87. Ces ratios indiquent que les modèles de Diamètre de l'étalement ( $D_E$ ) représentent parfaitement les résultats.

La figure IV.2 montre la relation entre les valeurs prédites et mesurées des réponses étudiées avec un intervalle de confiance de 95% (courbes rouges). Généralement, lorsque les lignes droites des moyennes (en bleu) ne sont pas complètement couvertes par l'intervalle de confiance à 95% courbes, on peut conclure que les modèles représentent bien les résultats.

**Tableau IV.3. Le coefficient de la corrélation  $R$  et son ajustement.**

R carré	0,788484
R carré ajusté	0,629847
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,389906
Moyenne de la réponse	74,875
Observations (ou sommes pondérées)	8

Le tableau IV.4 présente le test des effets qui influence sur la réponse étudiée ( $D_E$ ), on peut constater que les facteurs tel que le dosage des fines de (PC) et de sable fin sont les plus influant sur le comportement des BAP à l'état frais.

**Tableau IV.4. Facteurs influents sur ( $D_E$ )**

Source	LogWorth	P-value
pc(7,14)	1,276	0,05297
SF(-7,7)	1,191	0,06438
pc*SF	0,449	0,35563

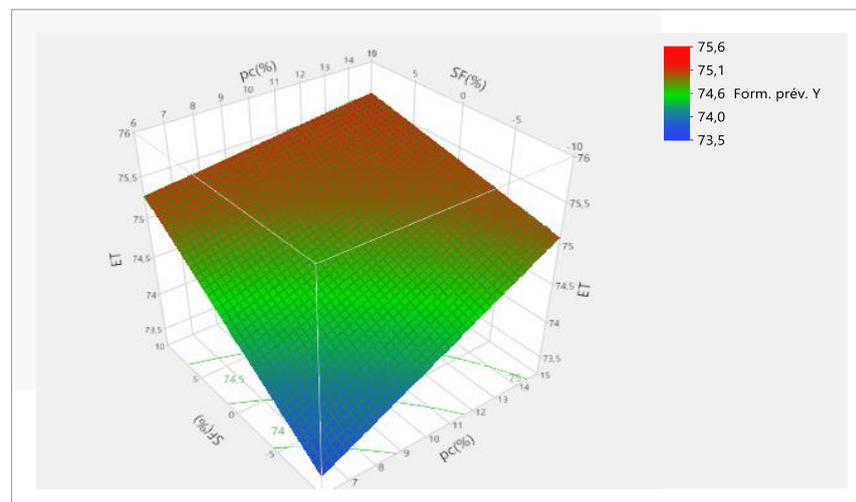
### ➤ Modèle mathématique

En effet, les variables indépendantes obtenues (PC) et (SB) les réponses sont introduites dans le logiciel JMP 10.0. Les modèles proposés pour la prédiction des réponses étudiées peuvent être écrits, comme indiqué dans l'équation (1).

$$D_E = 73,75 + 0,107 (PC\%) + 0,1284 (SF\%) - 0,0237 (PC\%) (SF\%)$$

Cette expression va nous permettre de prédire le diamètre d'étalement  $D_E$  des BAP- en utilisant les valeurs du dosage de (SF) et (PC).

### ➤ Surface de réponse



**Figure IV.3. Surface de réponse pour ( $D_E$ )**

La figure IV.3 présente la surface de réponse du modèle de  $D_E$  en fonction du dosage de (SF) et (PC). On constate que l'augmentation du pourcentage du SF et PC provoque une diminution de  $D_E$ .

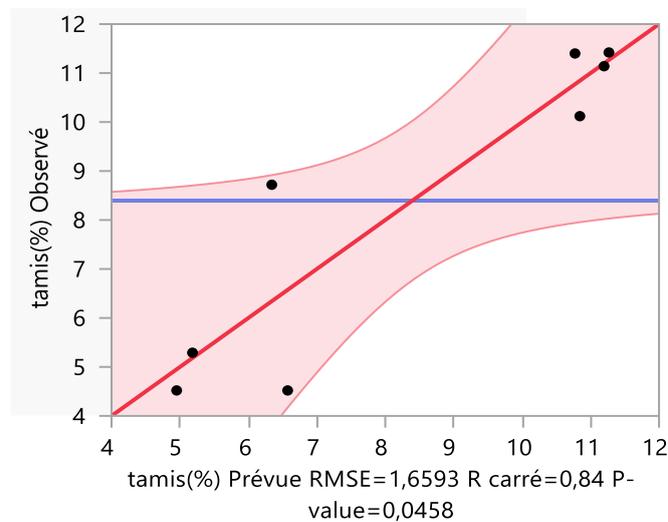
### b. Stabilisation au tamis ( $S_T$ ) (%)

Les essais de la stabilisation au tamis ont permis de donner les résultats suivants :

**Tableau IV.5. Valeurs des essais de stabilisation au tamis ( $S_T$ )**

Type de béton	Stabilisation au tamis (%)
<b>BAP7%PC+5%S</b>	<b>5.29</b>
<b>BAP7%PC-5%S</b>	<b>8.72</b>
<b>BAP7%PC+7%S</b>	<b>4.52</b>
<b>BAP7%PC-7%S</b>	<b>4.52</b>
<b>BAP14%PC+5%S</b>	<b>10.12</b>
<b>BAP14%PC-5%S</b>	<b>11.14</b>
<b>BAP14%PC+7%S</b>	<b>11.4</b>
<b>BAP14%PC-7%S</b>	<b>11.42</b>

#### ➤ Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées



**Figure IV.4. Graphique des valeurs observées de la stabilité au tamis ( $S_T$ ) en fonction des valeurs prévues**

Le tableau IV.6 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement

**Tableau IV.6. Le coefficient de la corrélation R et son ajustement.**

R carré	0,839144
R carré ajusté	0,718503
Racine de l'erreur quadratique moyenne	1,65934
Moyenne de la réponse	8,39125
Observations (ou sommes pondérées)	8

**Tableau IV.7. Facteurs influents sur (ST)**

<i>Source</i>	<i>LogWorth</i>	<i>P-value</i>
<b>pc(%)</b> (7,14)	1,959	0,01098
<b>SF(%)</b> (-7,7)	0,322	0,47672
<b>pc(%)</b> * <b>SF(%)</b>	0,156	0,69796

Le tableau IV.7. présente le test des effets qui influence sur la réponse étudiée (St),

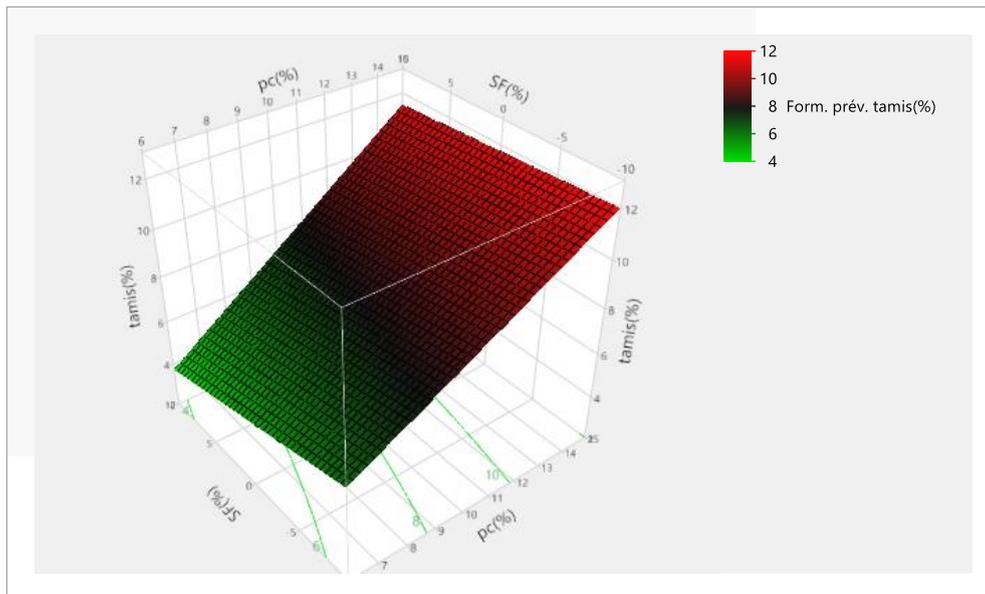
➤ **Modèle mathématique**

Les modèles proposés pour la prédiction des réponses étudiées peuvent être écrit, comme indiqué dans l'équation

$$ST = 0,505 + 0,751 (PC\%) + 0,197 (SF\%) - 0,0115 (PC\%) (SF\%)$$

Cette expression va nous permettre de prédire (ST) des BAP- en utilisant les valeurs du dosage de SF et PC surtout que le coefficient de corrélation R est important.

➤ **Surface de réponse**



**Figure IV.5. Surface de réponse pour la stabilisation au tamis (ST)**

La figure *IV.5.* présente la surface de réponse du modèle de stabilité au tamis (ST) en fonction du dosage de sable fin (SF) et la poudre de céramique (PC). On constate que l'augmentation du pourcentage du SF et PC provoque une augmentation de ST.

### c. Viscosité ( $\mu$ )

**Tableau IV.8 Caractéristiques rhéologiques des différents BAP mesurées par rhéomètre**

Type de béton	Viscosité (Pa .S)
<b>BAP7%PC+5%S</b>	<b>242.36</b>
<b>BAP7%PC-5%S</b>	<b>118.648</b>
<b>BAP7%PC+7%S</b>	<b>176.758</b>
<b>BAP7%PC-7%S</b>	<b>96.74</b>
<b>BAP14%PC+5%S</b>	<b>141.135</b>
<b>BAP14%PC-5%S</b>	<b>142.4</b>
<b>BAP14%PC+7%S</b>	<b>125.947</b>
<b>BAP14%PC-7%S</b>	<b>101.629</b>

### ➤ Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées

Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

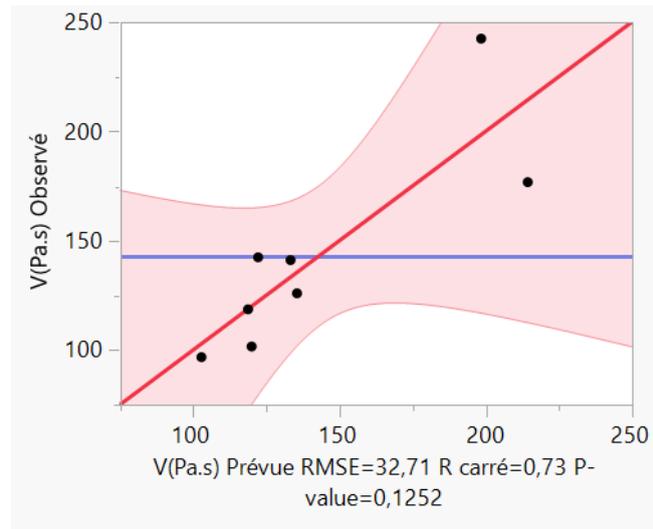


Figure IV.6. valeurs observées de la viscosité ( $\mu$ ) en fonction des valeurs prévues

Tableau IV.9. Le coefficient de la corrélation R et son ajustement

R carré	0,728296
R carré ajusté	0,524517
Racine de l'erreur quadratique moyenne	32,70981
Moyenne de la réponse	143,1988
Observations (ou sommes pondérées)	8

Le tableau IV.10 présente le test des effets qui une influence sur la réponse étudiée ( $\mu$ ).

Tableau IV.10 Facteurs influents sur la viscosité

Source	LogWorth	P-value
SF%(-7,7)	1,122	0,07551
pc(%)*SF(%)	0,837	0,14571
pc(%) (7,14)	0,597	0,25318

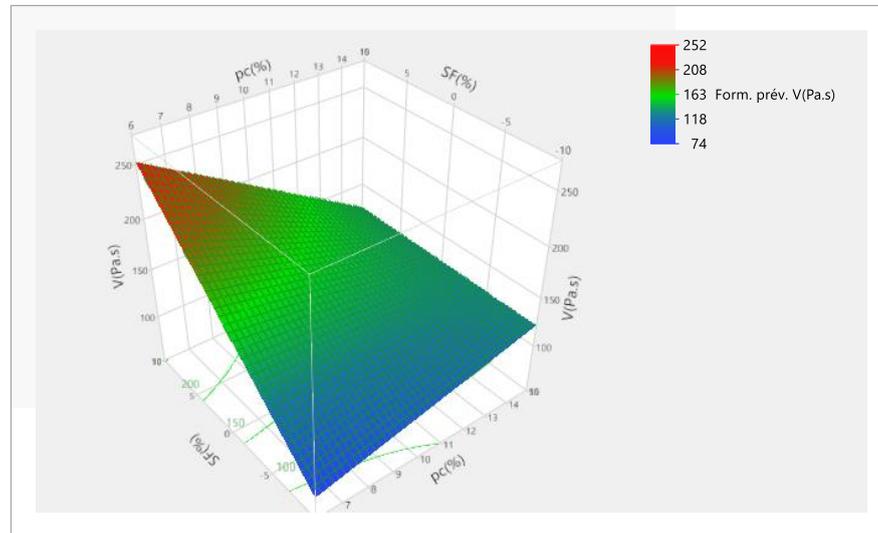
➤ **Modèle mathématique**

Le modèle proposé pour la prédiction des réponses étudiées peut être écrit, comme indiqué dans l'équation :

$$\mu = 189,47 - 4,41 (PC\%) + 14,82 (SF\%) - 0,979 (PC\%) (SF\%)$$

➤ **Surface de réponse :**

La figure IV.7 présente la surface de réponse du modèle de ( $\mu$ ) en fonction du dosage de (SF) et (PC).



*Figure IV.7. Surface de réponse de la viscosité ( $\mu$ ).*

On constate que l'augmentation du pourcentage du (SF) et (PC) provoque une diminution de ( $\mu$ ).

### IV.3.2. Résultats des essais à l'état durci

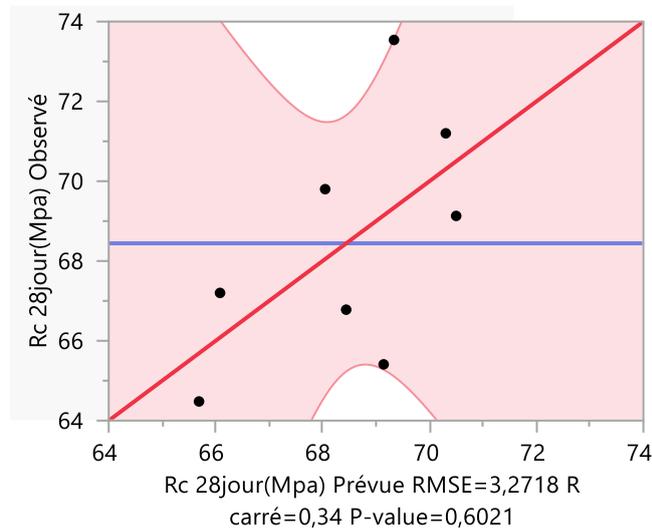
a. **La résistance à la compression  $R_{c28}$  à 28 jours :**

Type de béton	La résistance à la compression(MPa)	
	28jours	
<b>BAP7%PC+ 5%SF</b>	73.54	
<b>BAP7%PC - 5%SF</b>	71.20	
<b>BAP7%PC+ 7%SF</b>	65.41	
<b>BAP7%PC-7%SF</b>	69.13	
<b>BAP14%PC+ 5%SF</b>	69.80	
<b>BAP14%PC - 5%SF</b>	67.20	
<b>BAP14%PC+ 7%SF</b>	66.78	
<b>BAP14%PC-7%SF</b>	64.48	

*Tableau IV.11. Résultats des essais de compression*

➤ **Modélisation de la résistance à la compression à 28jours**

La relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées est illustrée à la figure IV.8, et le tableau IV.12 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.



**Figure IV.8.** Valeurs observées de  $R_{C28}$  en fonction des valeurs prévues

**Tableau IV.12.** Coefficient de la corrélation R et son ajustement pour  $R_{C28}$ .

R carré	0,342367
R carré ajusté	-0,15086
Racine de l'erreur quadratique moyenne	3,271765
Moyenne de la réponse	68,4425
Observations (ou sommes pondérées)	8

On remarque que le coefficient de corrélation R est faible, ce qui indique la dispersion des réponses d'un mélange à un autre.

Dans le tableau IV.13, on présente le test des effets qui influence la réponse étudiée ( $R_{C28}$ ), on peut constater que les facteurs tel que le dosage des fine PC et de sable fin sont les plus influant sur le comportement des BAP à l'état durci

Tableau IV.13. Facteurs d'influence sur  $R_{C28}$ 

Source	LogWorth	P-value
pc(7,14)	0,524	0,29955
pc*SF	0,316	0,48334
SF(-7,7)	0,094	0,80611

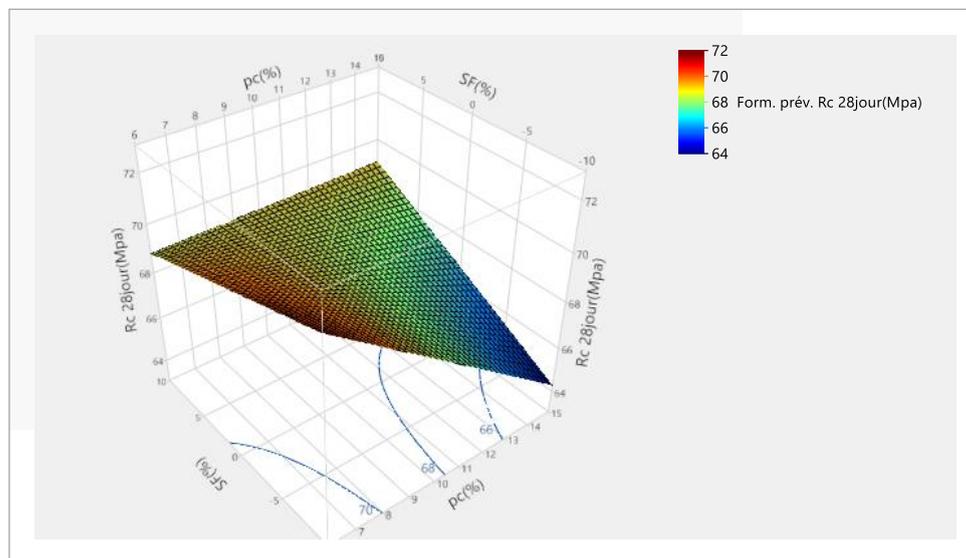
### ➤ Modèle mathématique

Le modèle proposé pour la prédiction des réponses étudiées peut être écrit, comme indiqué dans l'équation :

$$R_{C28} = 72,575 - 0,394 (PC\%) - 0,0131 (SF\%) + 0,006 (PC\%) (SF\%)$$

Cette expression va nous permettre de prédire  $R_{C28}$  des BAP- en utilisant les valeurs du dosage de SF et PC.

### ➤ Surface de réponse



**Figure IV.9. Surface de réponse de la résistance à la compression à 28 jours**

La figure IV.9 présente la surface de réponse de  $R_{C28j}$  en fonction du dosage de FS et PC. On constate que l'augmentation du pourcentage du FS et CR provoque une diminution de  $R_{C28j}$ .

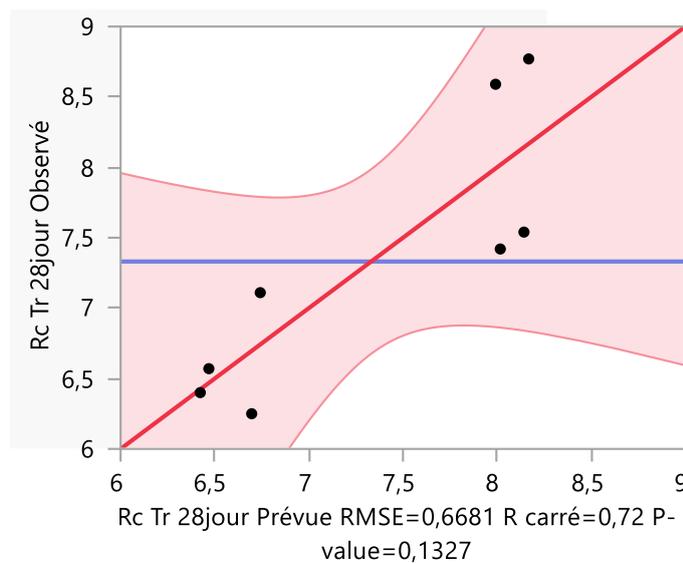
#### b. La résistance à la traction par flexion à 28 jours $R_{r28j}$

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.14

**Tableau IV.14. Résultats des essais de traction par flexion**

Type de béton	La résistance à la traction par flexion (MPa)	
	28jours	
<b>BAP7%PC+5%S</b>	7.42	
<b>BAP7%PC- 5%S</b>	7.54	
<b>BAP7%PC+7%S</b>	8.54	
<b>BAP7%PC -7%S</b>	8.77	
<b>BAP14%PC+ 5%S</b>	<b>6.25</b>	
<b>BAP14%PC -5%S</b>	<b>6.57</b>	
<b>BAP14%PC +7%S</b>	<b>7.11</b>	
<b>BAP14%PC -7%S</b>	<b>6.40</b>	

La relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées sont au graphique suivant :



**Figure IV.10. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues**

Le tableau 5.1 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.

**Tableau IV.15. Coefficient de la corrélation R et son ajustement.**

R carré	0,719722
R carré ajusté	0,509514
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,668125
Moyenne de la réponse	7,33125
Observations (ou sommes pondérées)	8

Le coefficient de corrélation R est relativement fort, ce qui indique une liaison assez forte entre  $R_{f28J}$  est les additions de (PC) et le (SF).

Le tableau IV.16 présente le test des effets qui influence la réponse étudiée.

**Tableau IV.16. Facteurs d'influence sur la traction par flexion**

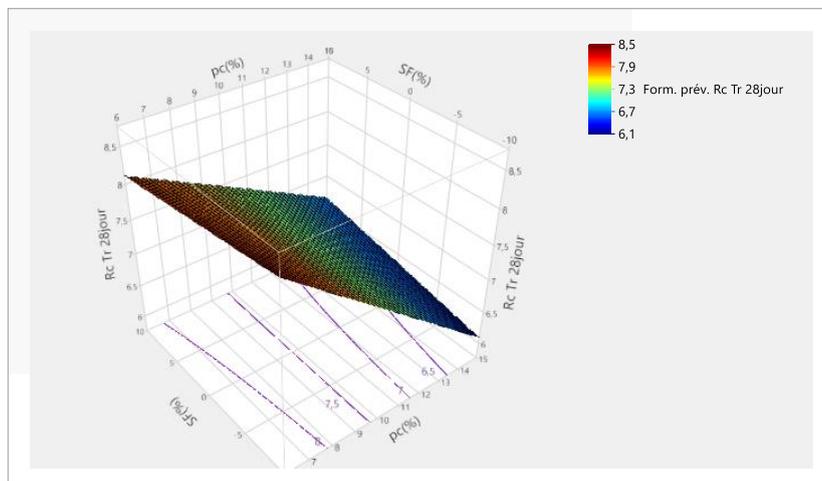
Source	LogWorth	P-value
pc(%) (7,14)	1,470	0,03387
pc(%) * SF(%)	0,172	0,67272
SF(%) (-7,7)	0,045	0,90183

➤ **Modèle mathématique**

.Le modèle proposé pour la prédiction des réponses étudiées peuvent être écrit, comme indiqué dans l'équation

$$R_{f28J} = 9,578 - 0,214 (PC\%) - 0,0479 (SF\%) + 0,0051 (PC\%) (SF\%)$$

➤ **Surface de réponse**



**Figure IV.11. Surface de réponse de  $R_{f28j}$  en fonction des pourcentages de (PC) et (SF)**

**Commentaire :**

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

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

Une technique classique est de vérifier si le modèle passe bien par les mesures en calculant l'écart entre les mesures et les prédictions du modèle, ou résidu. Si ce résidu est trop important, on peut alors envisager d'enrichir ou de corriger le modèle, puis éventuellement de mettre à jour le plan d'expériences et de refaire d'autres essais. La méthode peut ainsi être mise en œuvre de manière adaptative, c'est-à-dire en améliorant successivement le modèle en fonction des insuffisances rencontrées.

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues, nous permet de s'assurer qu'il ne reste pas d'informations à extraire de nos résultats.

En d'autre terme, les graphiques des résidus donnent une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En effet, il semble que les résidus sont répartis au hasard (pas une tendance particulière). Donc, on peut dire que les modèles issus de l'application de la méthode de plan d'expériences expliquent bien les résultats expérimentaux.

Les modèles statistiques dérivés pour la résistance mécanique reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiée. A partir de ces modèles dérivés de la résistance mécanique, on constate que la résistance mécanique à 28 jours est conditionnée d'abord par l'effet des particules fines du sable de dune et de la poudre de céramique, suivie par l'accroissement de la teneur de (PC). Par contre, l'effet couplé de (PC) et (SF) va augmenter (signe positive) la résistance à la compression et à la traction.

A partir des résultats obtenus des essais de compression et de flexion, on a pu construire des graphiques binaires présentant les effets des 02 facteurs (sable et poudre de céramique) sur la résistance mécanique.

#### **IV.4. Conclusion**

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

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail est de valoriser les déchets de céramique sous forme de poudre (PC) et d'étudier leurs effets avec la variation dans la granulométrie du sable de dune utilisé, sur la performance du béton auto plaçant à l'état frais ainsi que durci afin d'aboutir à une bonne optimisation. L'analyse des résultats, élaborés par Megueddem et Touabet [1], est déterminée à partir d'une démarche de modélisation statistique dite plans d'expérience qui est une nouvelle discipline intéressante dans le domaine de génie civil.

De nombreux logiciels consacrés aux plans d'expériences sont apparus. Dans cette étude nous avons fait appel au JMP.

Sur la base des résultats obtenue on conclut que :

- Au niveau des plans d'expériences :
  - Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique
  - Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences.
  - -Le but de cette nouvelle science est l'optimisation du choix des essais et de celui de leur enchaînement au cours de l'expérimentation.
  - la méthode des plans d'expériences est plus efficace que les démarches habituelles de conduite des essais, c'est-à-dire qu'elle permet d'arriver aux mêmes résultats avec trois à quatre fois moins d'essais. Ajoutons que cette méthode apporte à l'expérimentateur un puissant outil de réflexion et d'analyse qui lui permettra de conduire son expérimentation avec sûreté et précision.
  - avec les logiciels JMP qui est particulièrement bien adapté pour la construction et l'analyse des plans d'expériences, nous avons pu analyser et interpréter les résultats trouvés dans notre travail. Les résultats montrent également que les modèles ajustés sont de bonnes qualités et donnent des informations importantes concernant les effets de chacun des paramètres considérés ; des graphes iso réponses, traduisant en courbes les modèles mathématiques trouvés, ont pu également valider les différentes informations remarquées.

- l'utilisation des plans d'expériences va nous permettre de prédire par modélisation le comportement des BAP à base de granulats : sable, caoutchouc et plastique ;

Enfin nous suggérons de faire une continuité à cette étude en faisant une comparaison entre les différents logiciels des plans d'expériences avec des bétons ou mortier ayant les mêmes constituants avec le même dosage ;

- s'approfondir dans le domaine de recyclage des déchets inorganiques qui ne sont pas dégradables, dans le domaine de génie civil.

- la validation des résultats obtenus à partir de la modélisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Megueddem K. et Touabet K.**, l'influence de la variation du volume de pâte et le sable fin sur les BAP, mémoire de fin d'étude, l'université de BBA, juillet 2018.
- [2] **Baudouin M. AISSOUN**, « étude de l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée » Mémoire de maîtrise de l'université du SHERBROOKE, (Québec) Canada, Juillet 2015.
- [3] **H. KHAYAT**, « Colloques sur les bétons autonivelants » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1<sup>er</sup> Novembre 1996 ;
- [4] **OKAMURA. H., OZAWA, K.** (1994), "Self-compactable high performance concrete in Japan" ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand;
- [5] **HAYAKAWA, M., MATSUOKA, Y., YOKOTA, K.** (1995)." Application of super workable concrete in the construction of 70\_story building in Japan" ACI SP 154, Las Vegas ;
- [6] **ZUMI, I., YONEZAWA, T. IKEDA, Y., MUTA, A.** (1995) "Placing 10 000 m<sup>3</sup> super workable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome, Supplementary" Papers, 2<sup>nd</sup> CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas,
- [7] **Arch. Gie Wollaert**, Béton auto plaçant ,2005
- [8] **Boukni Bariza**, tenue au Feu des Bétons Autoplaçants, Mémoire de Magister Université Mentouri Constantine, Décembre 2007
- [9] **Groupe de travail « BAP »** : « Bétons auto-plaçant : Recommandations provisoires ». Association Française de Génie Civil. Juillet 2000.
- [10] **T. SEDRAN** : « Les bétons autonivelants (BAN) : Synthèse bibliographique ». Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 196, pp 53-60. Mars–Avril 1995.
- [11] **K.H. KHAYAT & Z. GUIZANI**: « Use of viscosity modifying admixtures to enhance stability of highly fluid concrete ». ACI Materials Journal. N° 94. 1994.

- [12] **P. TURCRY** : « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation ». Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil (Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes). Février 2004
- [13] **BOUKNI Bariza**, (contribution à l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants), Thèse de Doctorat de l'université de Mentouri constantine Juin 2012
- [14] **BILLBERG P.**, "Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration", Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.
- [15] **Hasni**, « Bétons Autoplaçants », rapport de recherche N° 98-004/98-006, Fédération Française du Bâtiment 1999.
- [16] **Sedran T.**, « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995. [17] **Hanaa Fares**. Thèse de doctorat en Génie Civil « Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Ecole Doctorale
- [18] **A.M. NEVILLE** : « Propriétés des bétons ». Version française traduit par CRIB. Eyrolles. 2000.
- [19] **G. DREUX & J. FESTA** : « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». 8ème Édition. Eyrolles. Mai 1998.
- [20] **R. DUPAIN, R. LANCHON & J.C. SAINT-ARROMAN** : « Granulats, sols, ciments et bétons : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ». Édition Casteilla. 1995.
- [21] **M. VENUAT** : « La pratique des ciments, mortiers et bétons ». 2ème Édition. Moniteur. V 2. 1989.
- [22] **M. VENUAT** : « Adjuvants et traitements des mortiers et bétons ». 1ère Édition. Publiée par l'auteur. Paris. P 429. 1971.
- [23] **C. JOLICOEUR** : « Superplasticizers : Chemistry, mode of action and performance criteria ». Béton Canada. Université de Sherbrooke. 1995.

- [24] **M. BAALBAKI** : « Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants ». Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [25] **S. NAGATAKI** : « Antiwashout admixtures for Under water concrete». RILEM Committee. TC84-AAC. P 8. May 1989.
- [26] **T. KAWAI**: « Non dispersible under water concrete using polymers». 5 th International Congress on Polymers in Concrete. Brighton. pp 5-6. September 1987.
- [27] **K.H. KHAYAT**: «Effects of antiwashout admixtures on fresh concrete properties». ACI
- [28] **Association Française de Génie Civil « AFGC »**, Bétons autoplaçants –  
Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.
- [29] **Turcry P.**, Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants –Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004,
- [30] **Josserand L**, Thèse de doctorat en Structures et Matériau, « Ressuage des bétons hydrauliques », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.
- [31] NF P 18-406 relative aux essais de compression des bétons.
- [32] **CHEKROUN Mathieu**, 2008 « Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface » Thèse de Doctorat, école Centrale de Nantes.
- [33] **J.S. Popovics**, sino dato « Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves » Thèse de Doctorat, sino loco.
- [34] **Auscultation sonique** : Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton  
» P18-418 ,1989.
- [35] **F.Gabrysak**, sino dato « Les bétons : Chapitre 04 », Ecole polytechnique fédérale de LAUSANE, institut des matériaux.
- [36] **BREYSSE.D et ABRAHAM.O**, 2005 « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[37] Mme **BENAKLI SARAH**. Mémoire de Magistère en Génie Civil « Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction »

[38] <http://www.primeverre.com/tout-sur-le-verre/>

[39] <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/etat-physique-du-verre>

[40] <http://www.infovitrail.com/index.php/fr/proprietes-du-verre>

[41] **Rachida IDIR** \*Martin CYR Arezki TAGNIT-HAMOU (DECEMBRE 2010) Peut- on valoriser massivement le verre dans les bétons ? Etude des propriétés des bétons de verre, rapport. Centre d'Etudes Techniques Université de Toulouse France

[42] **S. CHEKIREB**, « valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant » Mémoire de maîtrise de l'université du SHERBROOKE, (Québec) Canada, Juillet 2015.

[43] **SCHWARZ, N et NEITHALATH, N** : influence of a fine glass Powder on cement hydration : comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, cement and concrete research, vol, 38, n°4.2008.

[44] **INVACO2** : Séminaire International, INNOVATION & VALORISATION EN GENIE CIVIL & MATERIAUX DE CONSTRUCTION N° : 10-018 Chaïd R, Université de Boumerdès, Algérie

[45] <http://dx.doi.org.10.1080/19648189.2011.9693335>

[46] **Beaupré D**. Rheology of High Performance Shotcrete. PhD thesis, University of British Columbia, Canada, 1994; 265p.

[47] **Papo.A**, Rhéological models for cement pastes, 1998.

[48] Wallevik OH. Rheology a scientific approach to develop self-compacting

[49] Hu C, De Larrard F, Sedran T, Boulay C, Bosc F, Defiorene F. Validation of btrheom, the new rheometer for soft-to-fluid concrete. Materials and Structures, 1996; V 29, pp: 620-631.

[50] **Roshavelov T**. « prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning ». Cem concert RES 2005 ; 35:831-5.

- [51] **Hu, C.**, « Rhéologie des bétons fluides » .1995, Ecole Nationale des ponts et chaussées : paris. P.201.
- [52] **Papo, A.** (1988). Rheological models for cement pastes. *Materials and Structures*, 21(1), 41-46.
- [53] **R. B. Hamouda**, notions de mécanique des fluides, centre de publication universitaire
- [54] **F.DeLarrard.**, Rhéologie du béton frais remanié, BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 1998.
- [55] **G. Conrrazé et Grossiord.J.L**, Initiation à la rhéologie, 3éme édition, 2000.
- [56] **Evans.**, Letter of the editor: on the nature of the yield stress, 1992
- [57] **CREPAULT et ETIENNE**, rhéologie des bétons frais à base de ciment d'aluminates de calcium, QUEBEC : Faculté des études supérieures et post doctorales de l'Université Laval, 2012.
- [58] <https://www.constructioncayola.com/batiment/article/2009/06/24/31809/rheologie-des-betons-evolution-des-usages-perspectives>
- [59] **GOUPY Jacques** « Introduction aux Plans d'expériences ». Dunod. Paris. 303pages. (2001).
- [60] **BOX George.E. P., HUNTER William G., HUNTER J. Stuart** «Statistics for Experimenters» deuxième édition. John Wiley and Sons. New-York. 633pages. (2005).
- [61] **M.Vigier**, pratique des plans d'expériences : méthodologie taguchi .les éditions d'organisation, 1998
- [62] **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.
- [63] **SIER.** (1993) ; Informations et techniques. 1993. n°6.
- [64] **PILLET M.** (1992) ; Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, les éditions d'organisation Ed., Paris.
- [65] **D.Benoist et Y. Tourbier**, plan d'expérience construction et analyse .Editeur lavoisier TCE et DOC.