

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi – Bord Bou Arreridj

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريديج

Faculté des Sciences et de la Technologie

كلية العلوم و التكنولوجيا

Département Génie Civil

قسم الهندسة المدنية



# Mémoire de fin d'études

Mémoire pour L'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

## THÈME :

**Modélisation du comportement d'un béton auto plaçant à base des différents types de filler**

• Présenté par :

- ✓ Attoui Abdel Halim
- ✓ Aguida Ramzi

**Devant le Jury Composé de :**

M. Yacine Achoure	MCA, Université de BBA	Président
M. Belkadi Abdel Raouf,	MCB Université de BBA	Examineur
M. Ben Ammar Abd el Hafid	MCB, Université de BBA	Examineur
M. Noui Ammar	MCA, Université de BBA	Encadreur
M. Kessal Oussama	MCB, Université de BBA	Co-Encadreur de thèse

Année Universitaire : 2020/2021

---

## Résumé

---

Cette étude présente les résultats d'un programme expérimental dans lequel l'approche des plans d'expériences a été utilisée afin d'optimiser des bétons autoplaçants (BAP), formulés à base de matériaux locaux de l'Algérie. Les matériaux utilisés sont des fillers (Fines de calcaire (FC), fumée de silice (F.S), poussière de fours (CKD)). Les trois (3) fillers sont ajoutées par substitution partielle au liant.

Un plan de mélange à 3 facteurs a été utilisé afin de modéliser l'influence des trois fillers sur les propriétés d'un béton autoplaçant. Grâce à un logiciel d'analyse statistique Expert design, des modèles mathématiques expliquant au mieux les résultats d'essais, en particulier l'étalement, Boite L, la stabilité des tamis, ainsi que les propriétés mécaniques, ont été déterminés et développés dans ce travail. Ces modèles mathématiques ainsi obtenus permettent en fait la prédiction de l'effet de chacun des facteurs étudiés, séparément et en combinaison, sur les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) à base des trois fillers.

La technique de modélisation présente les capacités de prédiction et d'optimisation, en ce qui concerne les propriétés physico-mécaniques à l'état fraîche et durcie. L'analyse de variance (ANOVA) pour toutes les propriétés indique que le modèle quadratique modifié a pu prédire efficacement les propriétés fraîches et durcies du béton autoplaçant (BAP) à base des trois fillers avec un coefficient de détermination  $R^2$ .

**Mots clés :** modélisation, propriétés physico-mécanique, béton autoplaçant (BAP), Fumé de silice (F.S), poudre de calcaire (F.C), poussière de fours (CKD), plan de mélange. Les combinaisons optimales ,effet des fines sur la résistance a la compression ou a la flexion.

---

## Abstract

---

This study presents the results of an experimental program in which the design of experiments approach was used to optimize self-consolidating concretes (SCC), formulated from local materials from Algeria. The materials used are fillers (limestone powder, silica fume, oven dust). The three (3) fillers are added by partial substitution for the binder. A 3-factor mixing plan was used to model the influence of the three fillers on the properties of a self-consolidating concrete. Thanks to an Expert design statistical analysis software, mathematical models explaining as well as possible the test results, in particular the spreading, Box L, the stability of the sieves, as well as the mechanical properties, were determined and developed in this regard. job. These mathematical models thus obtained in fact allow the prediction of the effect of each of the factors studied, separately and in combination, on the properties of self-compacting concrete (SCC) based on the three fillers.

The modeling technique presents the capabilities of prediction and optimization, with regard to the physico-mechanical properties in the fresh and hardened state. Analysis of variance (ANOVA) for all properties indicates that the modified quadratic model was able to effectively predict the fresh and hardened properties of self-consolidating concrete (SCC) based on the three fillers with a coefficient of determination  $R^2$ .

**Key words :** modeling, physico-mechanical properties, self-consolidating concrete (SCC), silica fume, limestone powder, furnace dust, mixing plan.

## ملخص

تعرض هذه ذاتية الخرسانة لتحسين التجارب تصميم أسلوب استخدام فيه تم تجريبي برنامج نتائج الدراسة هذه تعرض من والمصنوعة الدمج ذاتية الخرسانات لتحسين التجارب تصميم أسلوب استخدام فيه تم تجريبي برنامج نتائج الدراسة تمت (.الفرن غبار السيليكا، دخان الجيري، الحجر مسحوق) الحشو هي المستخدمة المواد. الجزائر من محلية مواد إضافة الحشوات تأثير لنمذجة العوامل ثلاثية خلط خطة استخدام تم. للموثق الجزئي الاستبدال طريق عن 3) (الثلاثة الحشوات وتطوير تحديد تم الخبير، التصميم ذي الإحصائي التحليل برنامج بفضل. التماسك ذاتية الخرسانة خصائص على الثلاثة، الغرابيل واستقرار،) (والصندوق الانتشار، سيما ولا الإمكان، قدر الاختبار نتائج تشرح التي الرياضية النماذج فضلا في الطريقة بهذه عليها الحصول تم التي الرياضية النماذج هذه تسمح. مهنة. الصدد هذا في، الميكانيكية الخصائص عن ذاتية الخرسانة خصائص على ومجمعي، منفصل بشكل المدروسة، العوامل من كل بتأثير الخلط بالتنبؤ خطة الواقع على بنا الدك الثلاثة الحشوات. والمتصلبة الجديدة الحالة في الميكانيكية الفيزيائية بالخصائص يتعلق فيما والتحسين، التنبؤ قدرات النمذجة تقنية تقدم يشير فعال بشكل التنبؤ على را ا قاد كان المعدل التربيعي النموذج أن إلى الخصائص لجميع (ANOVA) التباين تحليل تحديد معامل مع الثلاثة الحشوات على بنا الدمج ذاتية للخرسانة والمتصلبة الجديدة بالخصائص. الحجر مسحوق السيليكا، دخان التماسك، ذاتية الخرسانة الميكانيكية، الفيزيائية الخصائص النمذجة،: **المفتاحية الكلمات** الفرن، غبار الجيري،.

---

## Liste des figures

---

### Chapitre I : Etat de l'art sur les bétons autoplaçants

<b>Figure I.1.</b>	Contexte de développement du béton autoplaçant au Japon.....	03
<b>Figure I.2.</b>	Répartition géographique des pays publiant sur le BAP durant les 25 dernières années avant 2016.....	04
<b>Figure I.3.</b>	Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.....	06
<b>Figure I.4.</b>	Critères requis pour obtenir une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage d'après Khayat.....	07
<b>Figure I.5.</b>	Méthode Japonaise de formulation d'un BAP proposée par Okamura et Ozawa et par Ouchi et al.....	08
<b>Figure I.6.</b>	Dimensions de mini entonnoir V et mini-cône .....	09
<b>Figure I.7.</b>	Phénomène de blocage des granulats aux endroits d'un obstacle.....	09
<b>Figure I.8.</b>	Essai d'étalement au cône (slump-flow).....	16
<b>Figure I.9.</b>	Entonnoir en forme V (Vfunnel).....	16
<b>Figure I.10.</b>	Essai de la boîte en L (L-box test) .....	17
<b>Figure I.11.</b>	Essai de la boîte en U (gauche), essai de caisson de remplissage (droite)...	18
<b>Figure I.12.</b>	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BO.....	19
<b>Figure I.13.</b>	Comparaison des modules élastique théoriques de béton autoplaçant (BAP) et de bétons vibrés (BV) Avec leur valeur expérimentale .....	20
<b>Figure I.14.</b>	Le pont Akashi Kaikyo.....	21
<b>Figure I.15.</b>	La tour Landmark Tower.....	22

### Chapitre II : Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

<b>Figure II.1.</b>	Aspect général de la fine de calcaire (F.C) .....	25
<b>Figure II.2.</b>	Aspect général de la fumée de silice (F.S).....	26

<b>Figure II.3.</b>	Aspect général de la poussière de fours (CKD).....	<b>27</b>
<b>Figure II.4.</b>	Courbes granulométriques de sable de dune.....	<b>28</b>
<b>Figure II.5.</b>	Courbes granulométriques des graviers de fraction 3/8 et 8/15.....	<b>29</b>
<b>Figure II.6.</b>	Essai au cône d'Abrams.....	<b>32</b>
<b>Figure II.7.</b>	Essai d'étalement.....	<b>33</b>
<b>Figure II.8.</b>	Essai au tamis.....	<b>34</b>
<b>Figure II.9.</b>	Stabilité au tamis.....	<b>34</b>
<b>Figure.II.10.</b>	Essai de boit L.....	<b>36</b>
<b>Figure II.11.</b>	L'appareil de compression.....	<b>37</b>
<b>Figure II.12.</b>	Essai de traction par flexion.....	<b>38</b>
<b>Figure II.13.</b>	Formule de calcul de la résistance de traction par flexion.....	<b>13</b>

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

<b>Figure III.1.</b>	Représentation des mélanges à (03) constituants sur un triangle équilatéral	<b>42</b>
<b>Figure III.2.</b>	Substitution de ciment par des ajouts de minéraux.....	<b>43</b>
<b>Figure III.3.</b>	Représentation triangulaire des 10 combinaisons étudiées à trois constituants.....	<b>44</b>
<b>Figure III.4.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour l'Etalement.....	<b>47</b>
<b>Figure III.5.</b>	Courbes iso-réponses de l'Etalement.....	<b>48</b>
<b>Figure III.6.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour l'Etalement.....	<b>49</b>
<b>Figure III.7.</b>	Courbes iso-réponses de Boite L.....	<b>50</b>
<b>Figure III.8.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour Stabilité des tamis.	<b>51</b>
<b>Figure III.9.</b>	Courbes iso-réponses de la stabilité des tamis.....	<b>52</b>
<b>Figure III.10.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 7 jours.....	<b>53</b>
<b>Figure III.11.</b>	Courbes iso-réponses de résistance à la compression à 7 jours.....	<b>54</b>
<b>Figure III.12.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 14 jours.....	<b>55</b>

<b>Figure III.13.</b>	Courbes iso-réponses de résistance à la compression à 14 jours.....	<b>56</b>
<b>Figure III.14.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 28 jours.....	<b>57</b>
<b>Figure III.15.</b>	Courbes iso-réponses de résistance à la compression à 28 jours.....	<b>58</b>
<b>Figure III.16.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la flexion à 7 jours.....	<b>59</b>
<b>Figure III.17.</b>	Courbes iso-réponses de résistance à la flexion à 7 jours.....	<b>60</b>
<b>Figure III.18.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la flexion à 14 jours.....	<b>61</b>
<b>Figure III.19.</b>	Courbes iso-réponses de résistance à la flexion à 14 jours.....	<b>62</b>
<b>Figure III.20.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la flexion à 28 jours.....	<b>63</b>
<b>Figure III.21.</b>	Courbes iso-réponses de résistance à la flexion à 28 jours.....	<b>64</b>
<b>Figure III.22.</b>	Graphique de distribution de probabilité normale pour l’Absorption d’eau...	<b>65</b>
<b>Figure III.23.</b>	Courbes iso-réponses de l’Absorption d’eau.....	<b>66</b>

---

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I : Etat de l'art sur les bétons autoplanants

<b>Tableau II.1.</b>	Propriétés physico-mécaniques du ciment utilisé.....	<b>24</b>
<b>Tableau II.2.</b>	Analyse chimique et minéralogique du ciment utilisé.....	<b>25</b>
<b>Tableau II.3.</b>	Composition chimique du filler calcaire utilisé.....	<b>25</b>
<b>Tableau II.4.</b>	Caractéristiques physiques des fines calcaires.....	<b>25</b>
<b>Tableau II.5.</b>	Composition chimique de la fumée de silice utilisé.....	<b>26</b>
<b>Tableau II.6</b>	Caractéristiques physiques des fines calcaires.....	<b>26</b>
<b>Tableau II.7.</b>	Composition chimique du filler calcaire utilisé.....	<b>27</b>
<b>Tableau II.8.</b>	Caractéristiques physiques des fines calcaires.....	<b>27</b>
<b>Tableau II.9.</b>	Caractéristiques physiques du sable de dune.....	<b>28</b>
<b>Tableau II.10.</b>	Caractéristiques physiques du G (3/8).....	<b>29</b>
<b>Tableau II.11.</b>	Caractéristiques physiques du G (8/16).....	<b>29</b>
<b>Tableau II.12.</b>	Analyse physico-chimique de l'eau.....	<b>30</b>

### Chapitre III : Résultats et discussions

<b>Tableau III.1.</b>	Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.....	<b>44</b>
<b>Tableau III.2.</b>	Formulations des mélanges selon un plan de mélange.....	<b>45</b>
<b>Tableau III.3.</b>	Résultats des essais de caractérisation.....	<b>46</b>
<b>Tableau III.4.</b>	ANOVA pour l'Etalement.....	<b>46</b>
<b>Tableau III.5.</b>	ANOVA pour la Boite L.....	<b>48</b>
<b>Tableau III.6.</b>	ANOVA pour la Stabilité des tamis.....	<b>50</b>
<b>Tableau III.7.</b>	ANOVA pour la résistance à la compression à 7jours.....	<b>52</b>
<b>Tableau III.8.</b>	ANOVA pour la résistance à la compression à 14 jours.....	<b>54</b>

<b>Tableau III.9.</b>	ANOVA pour la résistance à la compression à 28 jours.....	<b>56</b>
<b>Tableau III.10.</b>	ANOVA pour la résistance à la flexion à 7 jours.....	<b>58</b>
<b>Tableau III.11.</b>	ANOVA pour la résistance à la flexion à 14 jours.....	<b>60</b>
<b>Tableau III.12.</b>	ANOVA pour la résistance à la flexion à 28 jours.....	<b>62</b>
<b>Tableau III.13.</b>	ANOVA pour l'absorption d'eau.....	<b>64</b>

---

# Sommaire

---

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## Chapitre I : Etat de l'art sur les bétons autoplants

I.1. Introduction.....	03
I.2. Définition de BAP.....	03
I.3. Histoire du béton autoplaçant.....	03
I.4. Conditions de BAP.....	05
I.5. Avantage du BAP.....	05
I.6. Principes de base et exigences du BAP.....	06
I.7. Formulation des BAP.....	06
I.7.1. Méthode Japonaise.....	08
I.7.2. Méthode LCPC.....	10
I.7.3. Méthode suédoise.....	10
I.7.4. Autres méthodes.....	11
I.8. Constituants de béton autoplaçant.....	12
I.8.1. Ciment.....	12
I.8.2. Eau de gâchage.....	12
I.8.3. Gros granulats (Graviers).....	13
I.8.4. Granulats fin (Sable de dune).....	14
I.9. Caractéristiques du BAP.....	15
I.9.1. Caractéristiques du BAP à l'état frais.....	15
✓ Fluidité et mobilité en milieu non confiné.....	15
✓ Déformabilité et mobilité en milieu confiné.....	15
✓ Stabilité du mélange et résistance à la ségrégation statique.....	15
I.9.1.1. Essai d'étalement ( <i>Slump-flow</i> ).....	15
I.9.1.2. Essai de la boîte en L ( <i>L-box test</i> ).....	17
I.9.1.3. Essai de stabilité au tamis.....	18
I.9.2. Caractéristiques du BAP à l'état durci.....	18
I.9.2.1. Résistance à la compression.....	18
I.9.2.2. Résistance à la traction.....	19
I.9.2.3. Module d'élasticité.....	20
I.10. Domaine d'utilisation des BAP.....	21
I.11. Les intérêts du BAP.....	22
✓ Pour la mise en œuvre.....	22
✓ Sur la qualité du béton.....	22
✓ Concernant la conception.....	22
I.10. Conclusion.....	23

## Chapitre II : Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

II.1. Introduction.....	24
II.2. Matières Premières.....	24
II.2.1. Ciment.....	24
II.2.2. Ajouts utilisés.....	25
II.2.2.1. Fines calcaires (F.C).....	25
II.2.2.2. Fumé de silice (F.S).....	26

II.2.2.3. La Poussière de fours (CKD).....	26
II.2.3. Sable.....	27
II.2.4. Gravier.....	28
II.2.5. Adjuvant.....	30
II.2.6. Eau.....	30
II.3. Méthode et essais.....	31
II.3.1. Préparation de mélange.....	31
II.3.2. Essais de caractérisation des BAP.....	32
II.3.2.1. Méthodes de caractérisation du BAP à l'état frais.....	32
II.3.2.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN12 350-8].....	32
✓ Essai d'étalement (slump flow).....	33
✓ Matériel nécessaire.....	33
✓ Mode opératoire.....	33
II.3.2.1.2. Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11].....	34
✓ Objet de l'essai.....	34
✓ Matériel utilisé.....	34
✓ Mode opératoire.....	35
✓ Critères d'acceptabilité.....	35
II.3.2.1.3. Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10].....	35
✓ Objectif de la boîte en L.....	36
✓ Mode opératoire.....	36
II.4. Confection des éprouvettes.....	37
II.4.1. Type et tailles des moules.....	37
II.4.1.2. Conservation des éprouvettes.....	37
II.4.1.3. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci.....	37
II.4.3.1. Essai compression [NF EN206-1].....	37
✓ But de l'essai.....	37
✓ Principe de l'essai.....	37
✓ Conduite de l'essai.....	38
II.4.3.2. Essai de traction par flexion [NF P18-408].....	38
✓ But de l'essai.....	38
II.4.3.3. Essai d'absorption d'eau.....	39
II.4.3.4. La méthode des plans d'expériences.....	39
II.5. Conclusion.....	40

### **Chapitre III. Résultat et discussion.**

III.1. Introduction.....	41
III.2. Les plans d'expériences.....	41
III.3. Formulation de la composition de base.....	43
II.4. Exploitation des résultats du plan de mélange.....	45
III.4.1. Etalement.....	46
III.4.2. Boite L.....	48
III.4.3. Stabilité des tamis.....	50
III.4.4. Résistance à la compression.....	52
III.4.4.1. Résistance à la compression à 7 jours.....	52
III.4.4.2. Résistance à la compression à 14 jours.....	54
III.4.4.3. Résistance à la compression à 28 jours.....	56
III.4.5. Résistance à la flexion... ..	58
III.4.5.1. Résistance à la flexion à 7 jours.....	58
III.4.5.2. Résistance à la flexion à 14 jours.....	60
III.4.5.3. Résistance à la flexion à 28 jours.....	62

III.4.6. Absorption d'eau .....	64
III.5. Conclusion .....	66
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>68</b>





---

# Introduction générale

---

### **Introduction générale**

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde grâce à la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place. Depuis sa découverte, ce matériau n'avait que peu évolué mais, ces dernières années, d'importantes avancées ont été réalisées en améliorant certaines caractéristiques existantes, en particulier avec l'apparition des bétons de hautes performances, des bétons de poudres réactives et des bétons de fibre. Ces bétons visent tous un gain de résistance et de durabilité mais nécessitent une mise en œuvre appropriée. De ce point, une autre étape a été franchie avec l'arrivée du béton autoplaçant qui constitue une nouvelle technologie de construction [1].

Le béton autoplaçant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité, conformément aux exigences de durée de vie de certaines charges et conditions environnementales. Le BAP ayant une excellente capacité de remplissage et d'écoulement, et présente une bonne résistance à la ségrégation.

Le béton autoplaçant BAP connaît, aujourd'hui, une évolution rapide depuis sa création par les chercheurs japonais de l'université de technologie de Kochi au Japon, à la fin des années 80s [2-4]. L'idée du BAP a été éditée pour répondre au besoin d'un béton durable, de haute résistance, qui possède une grande fluidité et d'être capable à remplir les formes complexes des coffrages fortement ferrailés sans aucun recours aux moyens de vibration ou de compactage [2,3]. Le BAP a une capacité de déformation élevée sans ségrégation des constituants et sans ressuage grâce au volume important de la pâte cimentaire [5,7]. Le volume de gros granulats dans le BAP est généralement limité à 50% avec une taille maximale des grains de 16 mm, tandis que le volume de sable est à plus de 40% de volume total des agrégats [3,4]. Cette quantité de sable a pour rôle d'assurer la dispersion de gros granulats lors de l'écoulement de BAP par le fait de minimiser le frottement entre eux et ainsi d'assurer une bonne compacité de béton durci.

C'est dans cette optique, donc, que le présent travail a été entrepris. L'objectif principal de ce dernier sera axé sur l'étude de la possibilité d'utiliser la combinaison des trois additions différentes, la fumée de silice (F.S) et les fines calcaires (F.C), ainsi que la poussière de fours (CKD) par la technique de substitutions de ciment pour la fabrication des bétons autoplaçants (BAP). L'étude prévue va se concentrer surtout sur le comportement rhéologique à l'état frais, sur le comportement mécanique à l'état durci du BAP élaboré par la substitution d'une partie du ciment par trois facteurs (F.C, CKD, F.S).

Pour mener à bien ce travail, on va commencer par proposer une approche théorique et expérimentale contribuant à la formulation d'un béton autoplaçant, en utilisant une technique moderne telle que l'approche des 'plans de mélanges'.

Un plan de mélange bien déterminé va être utilisé afin de développer quelques modèles qui prédisent les propriétés du composite étudié, à l'état frais et à l'état durci afin d'optimiser sa composition.

Ces modèles permettent de comprendre les rôles joués par les différentes additions ou les paramètres, ou bien que les facteurs (à savoir : poussière de fours CKD, fumée de silice, fillers de calcaire), ainsi que l'effets des interactions (combinaison des facteurs sur les propriétés physico-mécaniques du béton autoplaçant).

Pour atteindre ces objectifs, notre présente thèse est divisée en trois chapitres :

**Le premier chapitre :** Ce chapitre I présente une synthèse bibliographique sur les bétons autoplaçant : Définition de BAP, Histoire du béton autoplaçant, Conditions de BAP, Avantages du BAP, Principes de base et exigences du BAP, Formulation des BAP, Constituants de Béton autoplaçant, Caractéristiques du BAP, Ainsi qu'une petite conclusion.

**Le deuxième chapitre :** présente les différents résultats expérimentaux obtenus lors de la caractérisation des matériaux de base, puis l'ensemble des techniques expérimentales utilisées pour les différents essais de caractérisation.

**Le troisième chapitre :** fait l'objet d'une analyse et discussion des résultats trouvés à l'issu d'un programme expérimental résultant de l'application d'un plan de mélange. A partir de la base de données issue de l'application de ce plan, nous présentons des analyses statistiques permettant de trier l'influence des facteurs étudiés (poussière de fours (CKD), Fumé de silice (F.S), Fines de calcaire (F.C)) par ordre d'importance, sur l'étalement, Boit L, stabilité des tamis, l'absorption d'eau, et la résistance mécanique à 7, 14, 28 jours des BAP préparés. Les modèles mathématiques ainsi trouvés, permettent de déceler l'effet de chaque facteur séparément et en interaction avec d'autres facteurs sur les réponses étudiées.

Enfin, une **conclusion générale** sur l'ensemble des résultats obtenus, ainsi qu'une présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

---

# Chapitre I: Etat de l'art sur les bétons autoplants

---

### I.1. Introduction :

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les connaissances relatives au béton autoplaçant. La première section traite la définition du BAP, son historique développement, ses avantages, les principes de base de sa composition, sa méthode de formulation, les essais caractérisant de ses caractéristiques et l'influence de ses composants sur leurs propriétés rhéologiques et mécaniques.

### I.2. Définition de BAP

Le béton autoplaçant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité, conformément aux exigences de durée de vie de certaines charges et conditions environnementales. Le BAP est un béton fluide qui s'écoule librement à travers les ferraillements condensés, il remplit convenablement le coffrage, et se consolide sous son propre poids sans nécessité de moyens de vibration ou de compactage. Le BAP ayant une excellente capacité de remplissage et d'écoulement, et présente une bonne résistance à la ségrégation [2,5].

### I.3. Histoire du béton autoplaçant

L'histoire du béton autoplaçant (BAP) remonte aux années 1980. La nécessité du BAP était déclarée la première fois par le prof. Hajime Okamura à l'université de technologie de Kochi au Japon en 1986 [6]. Pendant cette période, il y avait un manque dans le nombre des ouvriers qualifiés au Japon qui a directement affecté la qualité du béton (Figure I.1) [6,7]. À ce problème, le BAP a été édifié pour répondre au besoin d'un béton durable de haute résistance qui possède une bonne fluidité et qui est capable de remplir les coffrages de forme complexe et fortement ferrailés sans aucune nécessité de moyens de vibration ou de compactage [6,8].

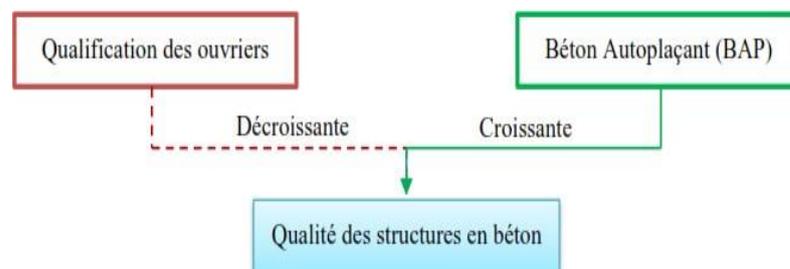


Figure I.1. Contexte de développement du béton autoplaçant au Japon [6].

---

A peu près à la même période, Aïtcin et *al.* [6] définissaient également le béton à haute performance comme un béton résistant à haute durabilité en raison du faible rapport eau/ciment. Depuis lors, le terme "béton hautes performances" est utilisé dans le monde entier pour désigner le béton à haute résistance. Par conséquent, Okamura a proposé de changer le terme de son nouveau béton en "béton autoplaçant à haute performance". En janvier 1989, Ozawa et *al.* [2] ont présenté le premier document sur le béton autoplaçant dans la deuxième conférence internationale sur l'ingénierie de structure et de la construction en Asie de l'Est et du Pacifique (EASEC-2) à Chlangmai-Thaïlande. En 1992 le concept de béton autoplaçant s'est répandu après la présentation d'Ozawa à la Conférence internationale CANMET/ ACI à Istanbul puis il est devenu un sujet d'intérêt commun pour les chercheurs et les ingénieurs intéressés par la durabilité du béton surtout après la publication d'Okamura en 1996 au congrès d'automne de l'ACI à New Orléans. En janvier 1997, le comité RILEM sur le béton autoplaçant a été formé et le 1<sup>er</sup> symposium sur le BAP a eu lieu à Stockholm en septembre 1999 [6].

Depuis cette date, la recherche sur le BAP a commencé d'accroître dans le monde entier jusqu'à nos jours. Plusieurs études ont été publiées traitant les caractéristiques fraîches et durcies du BAP dans de nombreux pays. L'Algérie est l'un des 35 pays au monde qui publie de nombreuses recherches qui traite le sujet du BAP, selon l'étude statistique réalisée par Desnerck et *al.* [9] en 2016 (Figure I.2).



**Figure I.2.** Répartition géographique des pays publiant sur le BAP durant les 25 dernières années avant 2016 [9].

#### I.4. Conditions de BAP

Pour qu'un béton soit autoplaçant il doit avoir un niveau satisfaisant de capacité d'écoulement, de remplissage et de stabilité. Le BAP est un béton liquide hétérogène de grande densité, il est très difficile de maintenir ses composants sous une forme cohérente. Les composants qui ont de grandes masses ont tendance à se sédimenter (phénomène de ségrégation des constituants). Toutefois, ce problème peut être résolu en ajoutant une quantité de matériaux fins et des superplastifiants SP. Les superplastifiants jouent un rôle prépondérant dans la réduction de la demande en eau du mélange, en produisant un béton très liquide avec moins d'eau possible [10]. Néanmoins, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation [11]. Dans cet axe, de nombreuses études de recherche ont été menées dans le but de définir les besoins en matières premières, les proportions du mélange, les exigences et les caractéristiques des matériaux, ainsi que les méthodes d'essai nécessaires pour produire et tester le BAP [8,12]. Généralement les études focalisent sur l'adaptation d'une bonne formulation du BAP et la prédiction de ses propriétés mécaniques et de sa durabilité [12,13].

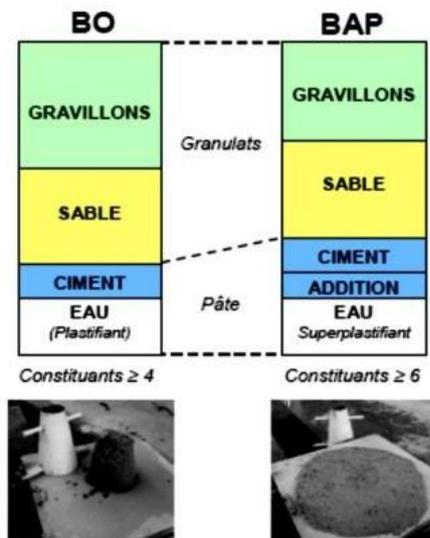
#### I.5. Avantages du BAP

Le béton autoplaçant offre beaucoup d'avantages. Certains sont comme suit [3,10,14,15] :

- ✚ Ecoulement facile à travers et autour de l'acier d'armature sous son poids propre et sans besoin d'équipement de vibration ou de compactage.
- ✚ Réduction les nuisances sonores grâce à l'absence de vibration.
- ✚ Favorise le bétonnage en grande masse dans les sections à géométrie complexe fortement ferraillée.
- ✚ Permet d'économiser le coût de coffrage grâce à son utilisation plus longtemps en raison de l'absence des équipements de vibration.
- ✚ Amélioration la résistance grâce à l'augmentation de la compacité et la diminution de la porosité.
- ✚ Assure une bonne étanchéité à l'eau et offre ainsi des propriétés de transport réduites et une durabilité adéquate.
- ✚ Offre une résistance initiale élevée et permet ainsi une réutilisation plus rapide du moule de coffrage, ce qui diminue la durée de construction et améliore la productivité.
- ✚ Convient parfaitement aux moules minces à géométrie complexe.
- ✚ Mise en place rapide du béton ce qui augmente la capacité de construction.
- ✚ Nécessite moins de main-d'œuvre pour le transport et la mise en place du béton, améliorant ainsi l'environnement de travail et la sécurité.
- ✚ Améliore l'aspect esthétique du béton et fournit la bonne finition sans aucun pore extérieur.

## I.6. Principes de base et exigences du BAP

En ce qui concerne sa composition, le BAP est composé à peu près des mêmes matériaux constitutifs que le béton ordinaire BO : ciment, granulats, eau plus les adjuvants chimiques et les additions minérales (**cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau, filler calcaire, pouzzolane, poussière de fours**, etc.) (Figure I.3) [16]. Habituellement, les adjuvants chimiques utilisés sont de type superplastifiant à haute réduction d'eau et éventuellement les agents modifiants de la viscosité. Les additions minérales sont utilisées, outre le ciment, comme matériau extra-fin et dans certains cas, elles remplacent le ciment. Cependant, il faut prendre un volume important en superplastifiant pour améliorer l'ouvrabilité et la viscosité apparente du BAP et pour tenir compte le volume important des éléments fins qui jouent le rôle de disperser les gros granulats afin de faciliter l'écoulement [17].



**Figure I.3.**Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [16].

## I.7. Formulation des BAP

Les objectifs de n'importe quelle méthode de formulation d'un béton sont [18] :

- Assurer une bonne maniabilité du béton après malaxage ;
- Le béton doit avoir un bon comportement mécanique, un aspect de parement lisse et une bonne durabilité ;
- Augmentation du rapport qualité/coût.

Il existe plusieurs méthodes de formuler un BAP [19,20]. Trois approches pratiques ont été Proposées par H. Okamura [7] :

- ✚ Augmentation de la quantité de pâte et l'utilisation d'un superplastifiant de manière à réduire le rapport eau sur liant E/L sans affecter la viscosité ;
- ✚ Utilisation d'un agent de viscosité, l'accroissement de la quantité de la pâte et l'utilisation d'un superplastifiant afin de d'augmenter la fluidité et diminuer le risque de ségrégation ;
- ✚ Faible augmentation de la quantité de liant ou de fibre et l'utilisation d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité pour obtenir une fluidité et une viscosité satisfaisantes.

Les trois approches citées ci-dessus forment des lignes directrices de la formulation d'un BAP qui peuvent être améliorées selon les nécessités. Dans ce contexte, Khayat [12] a résumé les critères à prendre en considération pour concevoir un BAP (Figure I.4).

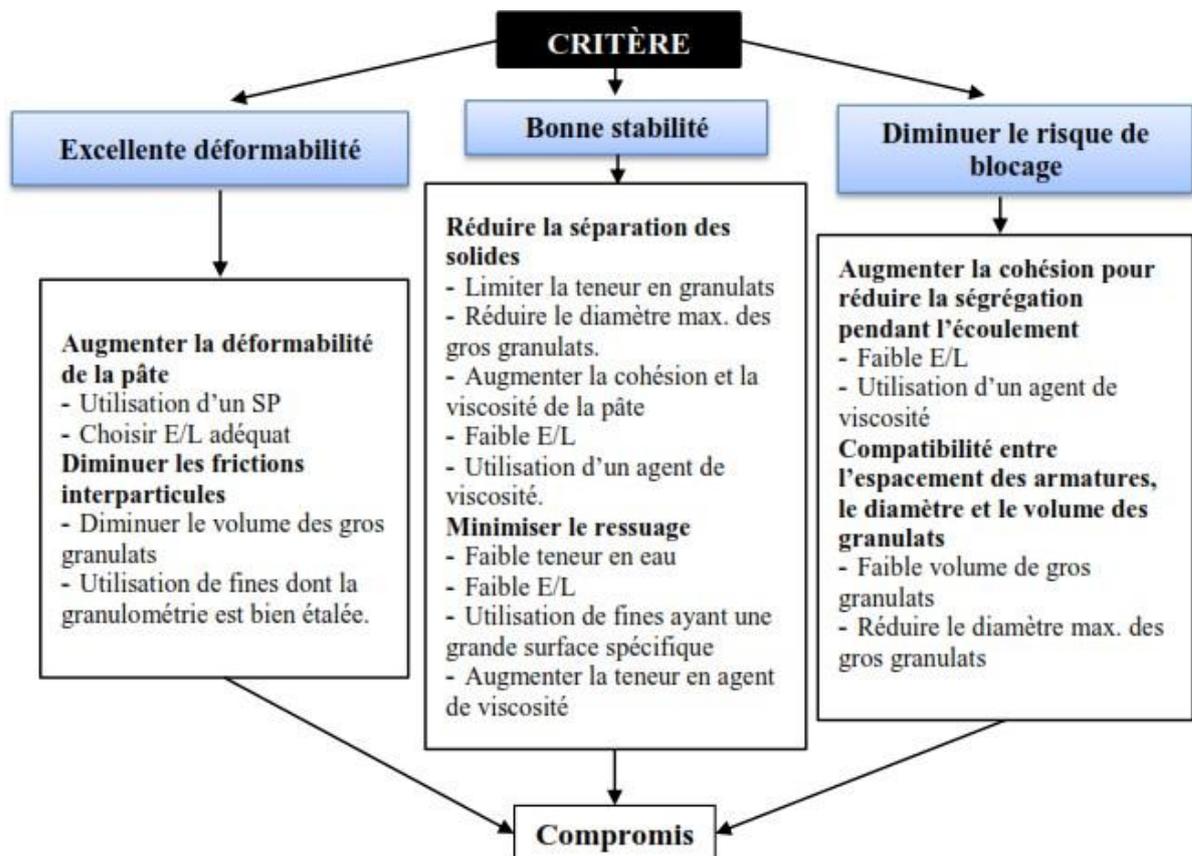


Figure I.4. Critères requis pour obtenir une bonne déformabilité, une stabilité acceptable et un faible risque de blocage d'après Khayat [12].

### I.7.1. Méthode Japonaise :

cette méthode était la première approche de la formulation d'un béton autoplaçant ; elle a été proposée par Okamura et Ozawa en 1995 [21] et par Ouchi et al.[22] en 1997. Le principe de la méthode est le suivant :

- ✚ Limitation de la teneur volumique en gros granulats du BAP par 50% du volume de solide.
- ✚ Limitation de volume du sable à 40% du volume total de mortier.
- ✚ Optimisation de la pâte sur le mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- ✚ Ajustement de la quantité d'eau, de superplastifiant et des fines (additions minérales) pour mortier de manière à obtenir une viscosité suffisante mesurée par temps d'écoulement dans l'entonnoir en V, et une fluidité importante mesurée par l'étalement au mini-cône (Figure I.6). Les étapes précédentes sont organisées dans l'organigramme de la Figure I.5 ci-après.

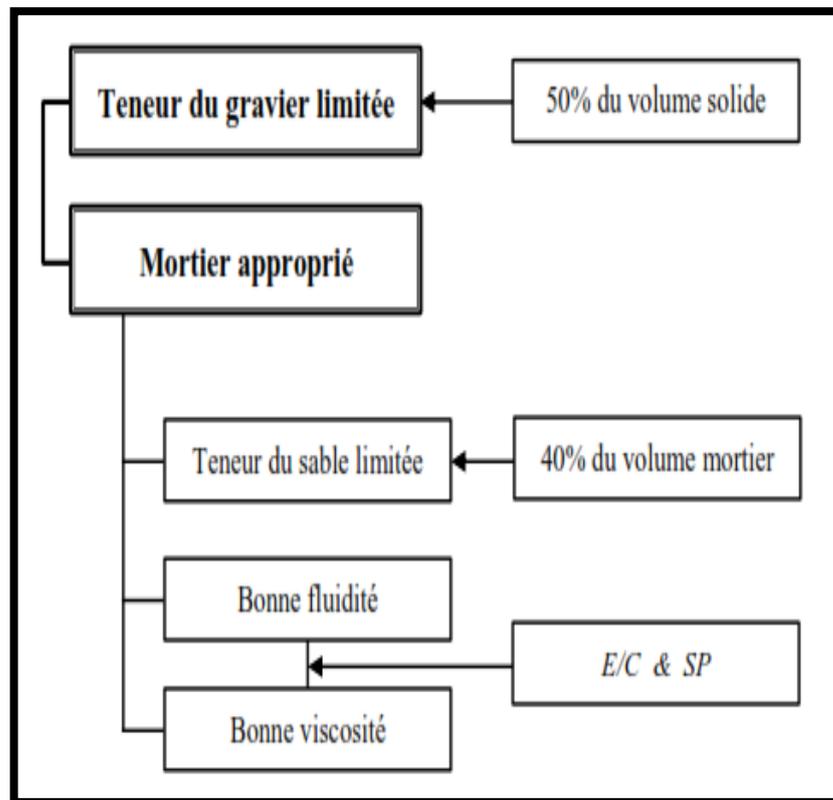
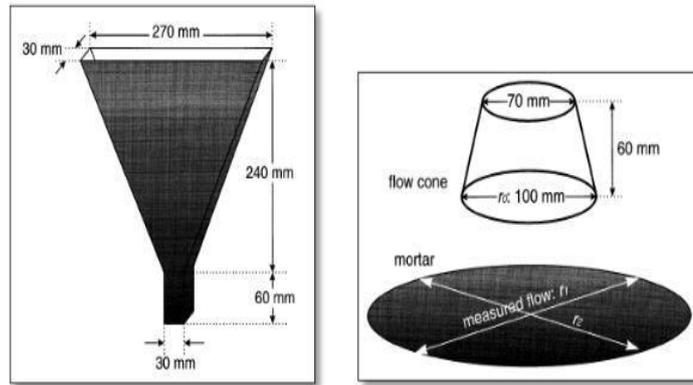


Figure I.5. Méthode Japonaise de formulation d'un BAP proposée par Okamura et Ozawa [17] et par Ouchi et al.[22]



**Figure I.6.** Dimensions de mini entonnoir V et mini-cône utilisés par [21,22].

Les auteurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif  $T_m$  et vitesse relative d'écoulement  $R_m$ . La fluidité du mortier est donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{(r_1 r_2 - r_0^2)}{r_0^2} \quad \text{Équation I-1}$$

Où  $r_1$  et  $r_2$  représentent les diamètres orthogonaux des étalements et  $r_0 = 100$  mm le diamètre inférieur du mini-cône.

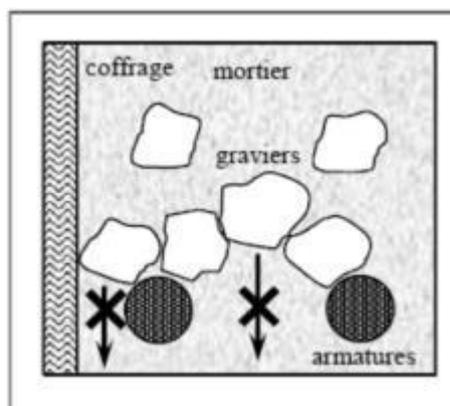
La viscosité relative du mortier est donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad \text{Équation I-2}$$

Avec :  $t$  le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en second.

Afin d'obtenir un BAP acceptable, il faut avoir simultanément :  $T_m = 5$  et  $R_m = 1 \text{ S}^{-1}$

Cette méthode est générale et simple. Il faut faire attention aux risques de blocage.



**Figure I.7.** Phénomène de blocage des granulats aux endroits d'un obstacle [23].

Dans le schéma de la Figure I.7, l'entraînement des granulats au droit des armatures est facilité par des forces de viscosité (qui sont liées à la viscosité du mortier et la vitesse d'écoulement).

### **I.7.2. Méthode LCPC : suggérée par DE LARRAD et al.[24]**

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

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions des mélanges ;
- La compacité propre ;
- La densité apparente ;

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

- ✚ La proportion de liant est fixée à priori (70% de ciment et 30% d'addition par exemple) ;
- ✚ Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé ;
- ✚ Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé ;
- ✚ Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

Une formulation du BAP est donc basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance à la compression ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent, les propriétés requises en déformabilité, stabilité et résistance à la compression pour BAP sont atteintes.

### **I.7.3. Méthode suédoise : proposée par PETERSSON et al. [25]**

La méthode est basée sur l'étude effectuée par TANGTERMSIRIKUL et al. [26]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. A l'aide de l'Equation I-3, ils estiment le volume de la pâte critique pour le blocage pour un confinement donné et pour chaque rapport granulats/sable ( $G/S$ ).

$$R_b = (1 - V_p) \sum_i \frac{Y_i}{v_{critique; d_i}} \quad \text{Équation I-3}$$

$Y_i$  : Proportion volumique de grains de taille  $d_i$  rapportée au volume de granulats ;

$V_p$  : Proportion volume de la pâte dans le béton ;

$v_{critique; d_i}$  : Fraction en volume de grain de taille «  $d_i$  » rapportée au volume de granulats ; induisant un blocage.

Le rapport  $G/S$  final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées en ouvrabilité, stabilité et résistance à la compression.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustée par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulats.

#### **I.7.4. Autres méthodes :**

D'autres méthodes de formulation ont été publiées telle que la méthode basée sur le plan d'expérience proposée par Khayat [12] en 1999 et celle qui repose sur la théorie de « l'excès de pâte » [27]. Khayat [12] a prouvé que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Ils ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de liant (ciment et ajouts), le rapport massique eau/liant ( $E/L$ ), la masse de superplastifiant et masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à vingt-cinq. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, celle-ci fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas aux exigences pour les BAP en : étalement, capacité de remplissage, etc.

## **I.8. Constituants de Béton autoplaçant**

Les matériaux constituant du BAP sont les mêmes que ceux utilisés dans le béton conventionnel. Dans la plupart des cas, le choix des matériaux dépend à sa disponibilité et au type de structures à construire. Toutefois, afin de garantir l'uniformité des performances du BAP, des précautions supplémentaires lors de la présélection des matériaux et contrôle périodique de ses propriétés sont nécessaires [28,31].

### **I.8.1. Ciment**

Le superplastifiant (SP), haut réducteur d'eau, est un composant essentiel du BAP pour lui fournir l'ouvrabilité nécessaire [14,22]. Il réduit la viscosité plastique du béton par leur action lubrifiante [32]. Les SP sont des molécules organiques (polymères) chargées négativement alors que les particules solides de ciment sont chargées positivement en raison de la concentration importante d'ions calcium dans la solution interstitielle, et de l'adsorption de ces ions sur les C-S-H [37–38]. Lors de malaxage du béton, le SP est adsorbé à la surface des particules solide de ciment ce qui augmente les forces de répulsions électrostatiques ou stériques et induit à la diminution de contact entre ces particules [39,40]. De ce fait, l'eau retenue entre particules est libérée et l'ouvrabilité du béton sera améliorée. La capacité d'un superplastifiant à améliorer l'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs tels que le type et le dosage de SP, le rapport eau / liant, la nature du ciment et les additions minérales [30].

Les superplastifiants de nouvelle génération à base de poly-Carboxylate Ether (PCE) sont les plus utiles pour la confection de BAP [41,42]. Cette génération ne présente pas d'effets secondaires retardataires. Elle permet d'obtenir une excellente réduction du rapport E/L, bonne ouvrabilité et augmentation de la résistance dès le premier jour [35,43,44]. Cela est probablement lié au développement d'une microstructure plus dense lorsque les grains de ciment sont bien dispersés [29,42]. L'utilisation de SP permet de réduire la perméabilité et d'améliorer la durabilité grâce à la réduction du rapport eau/ciment et la création d'une structure plus compacte [11,45,46].

### **I.8.2. Eau de gâchage**

L'eau est le composant le plus important du BAP. L'hydratation du ciment ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. Une eau adéquate est requise pour l'hydratation du ciment et elle est nécessaire en présence avec le superplastifiant pour atteindre la fluidité du BAP en lubrifiant la matrice [21].

L'eau destinée à être utilisée dans le béton doit être propre et exempte de substances nocives. Une eau contenant des substances nocives telles que des limons, des particules en suspension, des matières organiques, de l'huile ou du sucre peut affecter négativement la résistance et les propriétés de prise du ciment [32].

L'eau de mélange pour BAP doit être chimiquement sûre. Le pH de l'eau de mélange doit être compris entre 6,0 et 8,0 [32,41,47]. Il ne doit pas contenir de grandes quantités de solides dissous, de chlorures, d'alcalis, de carbonates, de bicarbonates, de sulfates et d'autres sels pouvant nuire à la performance du béton. L'eau contenant des ions chlorures, des ions  $SO_3$  et des solides dissous inférieurs à 500, 1000 et 2000 mg/L, respectivement, est généralement satisfaisante pour la fabrication de béton [32,47]. Par conséquent, l'adéquation de l'eau doit être examinée avant utilisation.

### **I.8.3. Gros granulats (Graviers)**

Comme pour tout béton, les gros granulats sont également un élément-clé dans la composition du BAP. Il est possible d'utiliser des granulats naturels, arrondis, semi-concassés ou concassés pour confectionner du BAP [9,79,80]. Les recyclés issus des déchets de constructions ont peut être utilisés comme remplacement partiel ou totale des granulats naturels dans BAP [81,82]. Les granulats influencent de manière significative les propriétés du BAP à savoir la fluidité, la résistance à la ségrégation, la résistance mécanique du béton et la durabilité [83]. Les caractéristiques des granulats doivent être prises en compte pour les performances requises du béton frais et durci [80].

Les caractéristiques physiques telles que la taille, la forme, la texture de la surface des grains et la porosité des gros granulats affectent les propriétés et la durabilité du béton. La taille maximale nominale pour BAP peut être de 20 ou 25mm. Cependant, une taille plus petite (10 à 20 mm) est préférable pour produire une résistance élevée [10,48,53] et pour réduire la ségrégation du BAP frais. La forme et la texture des gros granulats influencent la compacité du squelette granulaire et l'affectent considérablement les propriétés du BAP [54,55]. Pour une bonne fluidité du BAP, les granulats sphériques sont préférables que les granulats anguleuses (concassés) car ils diminuent la viscosité plastique du BAP grâce au faible frottement entre ses grains [10,56,57]. Inversement, les granulats anguleuses ou concassés sont bénéfiques pour développer une bonne résistance et à une forte liaison avec la pâte cimentaire grâce à la surface rugueuse de ses grains [58,59].

Cependant, la rugosité de la surface, l'aplatissement et l'angularité des grains des granulats concassés ne favorisent pas l'écoulement du BAP, dû au frottement important entre ses grains et à la viscosité plastique accrue [60]. Ce type de granulats nécessite plus d'eau et plus de superplastifiant pour maintenir l'ouvrabilité et l'écoulement du béton.

La granulométrie des gros granulats affecte également les propriétés d'écoulement et la résistance à la ségrégation du BAP [57]. La bonne distribution des grains contribue à la formation d'un mélange optimal moins poreux, à l'amélioration de l'ouvrabilité et à minimiser

Le risque de ségrégation dans le béton frais [57]. Il améliore également les propriétés mécaniques et la durabilité du béton durci grâce à l'amélioration de la compacité [61]. Les mélanges du BAP peuvent utiliser des granulats mal gradués mais cela nécessite de fournir plus de viscosité pour éviter les problèmes de ségrégation.

#### **1.8.4. Granulats fins (Sable de dune)**

Le sable dunaire SD est un sable fin siliceux disponible en quantités très abondantes dans les régions désertiques. Le SD se caractérise par une grande finesse et une capacité d'absorption d'eau élevée. La granulométrie de SD est très serrée où la taille des particules est dans la classe 0.08-0.8 mm, [62,63]. Les formes des grains de SD sont sphériques arrondies d'une surface lisse avec des grosseurs presque uniformes [63,64]. Cette forme des grains est un facteur bénéfique pour améliorer la maniabilité du béton. La masse volumique absolue de SD est dans l'intervalle 2.44 à 2.87 g/cm<sup>3</sup> selon le site de sa provenance [65,66]. L'utilisation de SD comme granulat fin jusqu'à certaine limite améliore l'ouvrabilité de béton, cette limite varie d'un sable à un autre selon leurs propriétés et leurs origines [36,67,69]. La forme sphérique arrondie de SD peut être une propriété utile pour améliorer l'écoulement du béton. Mais la forte absorption d'eau et la grande finesse de SD peuvent conduire à un béton cohérent avec une faible ouvrabilité ce qui nécessite d'ajouter une quantité d'eau supplémentaire et/ou d'utiliser un superplastifiant afin de garder une maniabilité satisfaisante [66]. L'augmentation de la quantité du SD dans le béton peut causer la diminution de la résistance à la compression et à la traction vue que sa granulométrie serrée [66,67,68,70].

## I.9. Caractéristiques du BAP

### I.9.1. Caractéristiques du BAP à l'état frais :

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures et coffrages). Ils doivent donc offrir une bonne résistance à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage), mais aussi à la ségrégation « statique » (une fois en place), afin de garantir l'homogénéité de leurs caractéristiques, de ne pas présenter de ressuage ou de tassement et de garantir un remplissage optimal des coffrages. Trois principaux paramètres permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP et leurs propriétés à l'état frais :

- ✚ **Fluidité et mobilité en milieu non confiné** : Signifie la capacité du BAP à s'écouler et à remplir les coffrages infinis avec une viscosité suffisante. Ce paramètre est caractérisé par la mesure d'étalement au cône d'Abrams selon norme **NF EN 12350-8**.
- ✚ **Déformabilité et mobilité en milieu confiné** : Il s'agit de la capacité du BAP à s'écouler à travers des obstacles et à remplir les coffrages fortement armés sans ségrégation dynamique. La déformabilité est caractérisée par l'essai de la boîte en L selon la norme **NF EN 12350-10**.
- ✚ **Stabilité du mélange et résistance à la ségrégation statique** : C'est la capacité du BAP à rester homogène après sa mise en œuvre. Ce paramètre est identifié par l'essai de stabilité au tamis selon norme **NF EN 12350-11**.

#### I.9.1.1. Essai d'étalement (*Slump-flow*) :

La fluidité et la mobilité du BAP en milieu non confiné sont caractérisées par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou *slump-flow*). Le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique (Figure I.8). L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en 6 litres de béton, puis de le soulever et de mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue (2 mesures correspondant à 2 diamètres perpendiculaires). Plus le diamètre est grand, plus le matériau est fluide.

La norme NF EN 12350-8 classe le BAP en trois catégories selon l'étalement :

- $550 \leq SF \leq 650$  mm : BAP convient aux structures en béton non renforcées ou légèrement renforcées.

- $660 \leq SF \leq 750$  mm : BAP convient aux applications courantes (murs, colonnes).
- $760 \leq SF \leq 750$  mm : BAP convient aux applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes.

Des valeurs de  $SF > 850$  mm peuvent être spécifiées dans quelques cas spéciaux mais le grand soin devrait être pris concernant la ségrégation et la taille maximum.

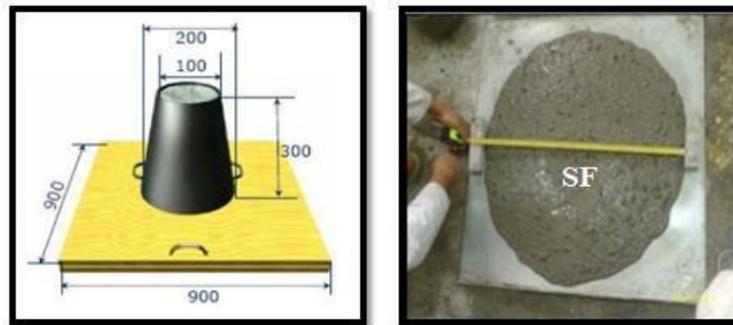


Figure I.8. Essai d'étalement au cône (slump-flow) [71].

Par ailleurs, il est possible de mesurer le temps  $T_{500}$  pour atteindre un étalement de 500 mm, ce qui donne la vitesse d'écoulement et par conséquent indique la viscosité apparente. La norme [NF EN 12350-8] classe le BAP en deux viscosités apparentes selon le temps  $T_{500}$  : **VS1** ( $T_{500} < 2$  sec) et **VS2** ( $T_{500} < 2$  sec).

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (*V-funnel*) (Figure I.9). Cet essai (*V-Funnel*) consiste à déterminer le temps d'écoulement du BAP à travers l'orifice d'un entonnoir en forme V, ce qui indique sa viscosité.

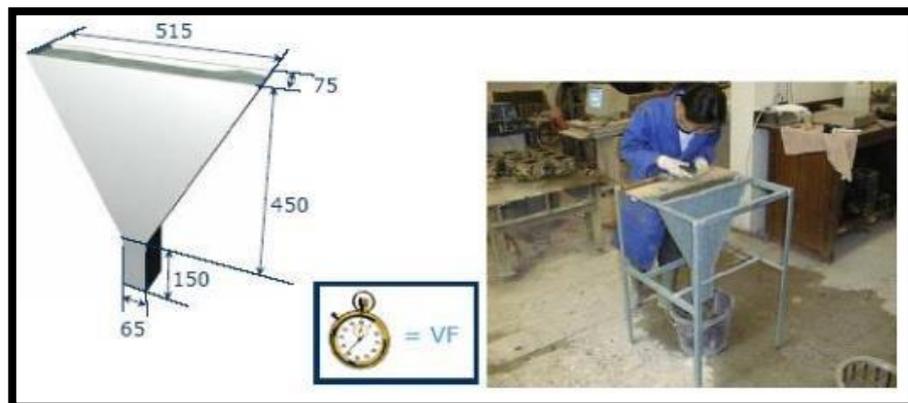


Figure I.9. Entonnoir en forme V (V funnel) [71].

### I.9.1.2. Essai de la boîte en L (L-box test) :

La mobilité du BAP en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, sont mesurées avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir du BAP dans la partie verticale d'une boîte en forme de L, puis en levant une trappe (séparant les parties verticale et horizontale de la boîte) de laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures de diamètre de 12 mm (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm) (Figure I.10). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale ( $H_1$  côté trappe) et horizontale ( $H_2$ ) [48].

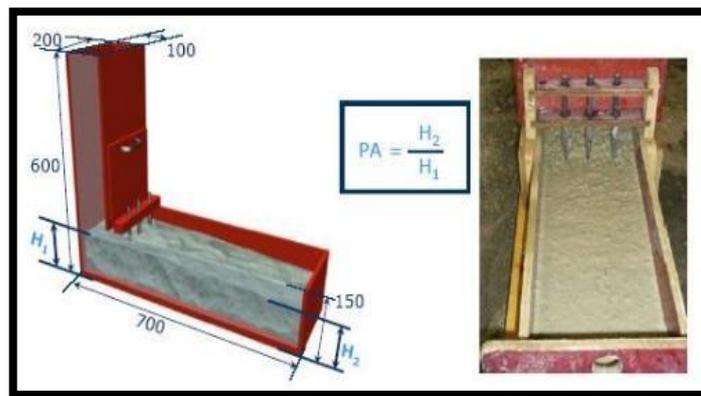


Figure I.10. Essai de la boîte en L (L-box test) [71].

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $PL = H_2/H_1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné.

Pour que le BAP soit accepté, la capacité de remplissage  $PL$  doit être supérieure à 0,8 selon la norme **NF EN 12350-10**. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

Il existe d'autres essais, tels que l'essai de tube en U et l'essai de caisson, qui permettent de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP (Figure I.11).

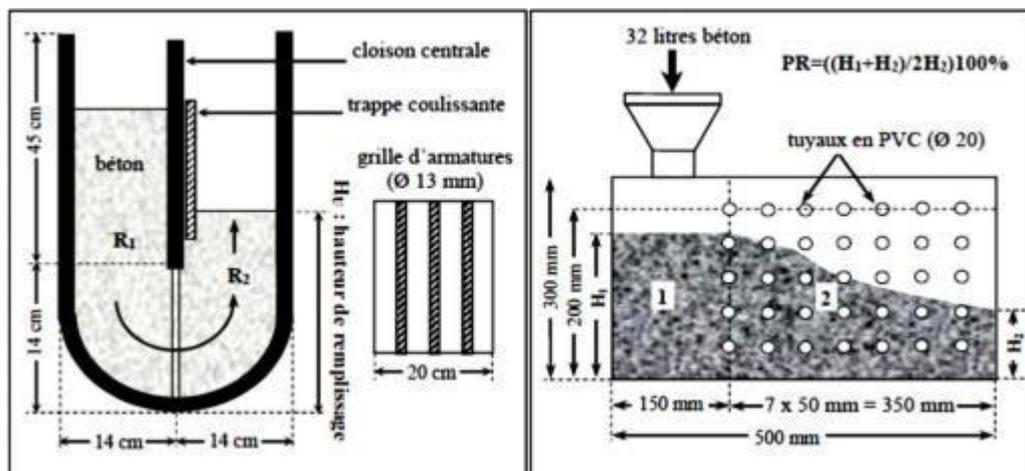


Figure I.11. Essai de la boîte en U (à gauche), essai de caisson de remplissage (à droite) [23].

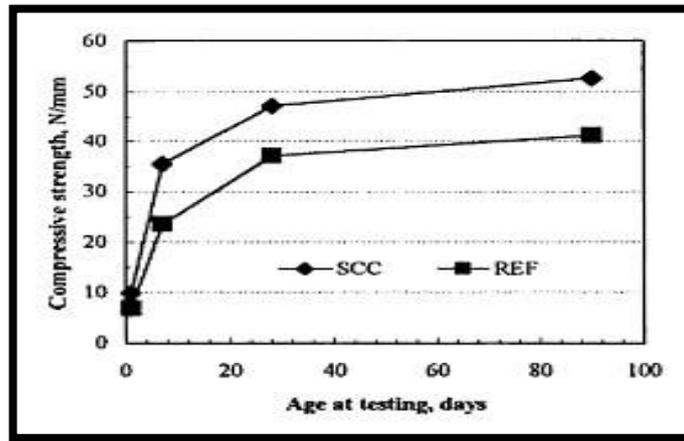
### I.9.1.3. Essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation « statique » et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis (Figure I.12).

## I.9.2. Caractéristiques du BAP à l'état durci :

### I.9.2.1. Résistance à la compression

Les bétons autoplaçants semblent développer en général des valeurs de résistance à la compression plus élevées par rapport au béton ordinaire BO de la même classe de résistance [73]. Ceci est attribué aux changements dans la zone d'interface de transition (ITZ) causés par les additions minérales. Zhu et *al.*[33] ont étudié les propriétés micromécaniques de la zone ITZ d'un BAP et d'un béton ordinaire BO. Ils ont rapporté que la zone ITZ était plus dense et significativement plus uniforme dans le BAP que dans le BO. Cependant, Lorsque les rapports E/L sont similaires, la résistance à la compression et le développement de la résistance du BAP et du BO ne sont pas significativement différents (Figure I.12). Le développement de la résistance du BAP et du BO sur une période de temps est presque similaire [34]. Le BAP peut facilement obtenir une résistance à la compression de 50 à 60 MPa à 28 jours [74]. La résistance pourrait être encore améliorée en utilisant les additions au ciment [75].



**Figure I.12.** Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BO (REF) correspondant [120].

Les travaux de [76,77] montrent que la résistance mécanique s'accélère aux jeunes âges en utilisant les fillers. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

L'augmentation de la résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours. Le dosage en adjuvant, dans la formulation des BAP, peut aussi influencer sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Généralement les résistances caractéristiques à la compression et à la traction se situeraient, respectivement, autour de 60 MPa et 5 MPa [78].

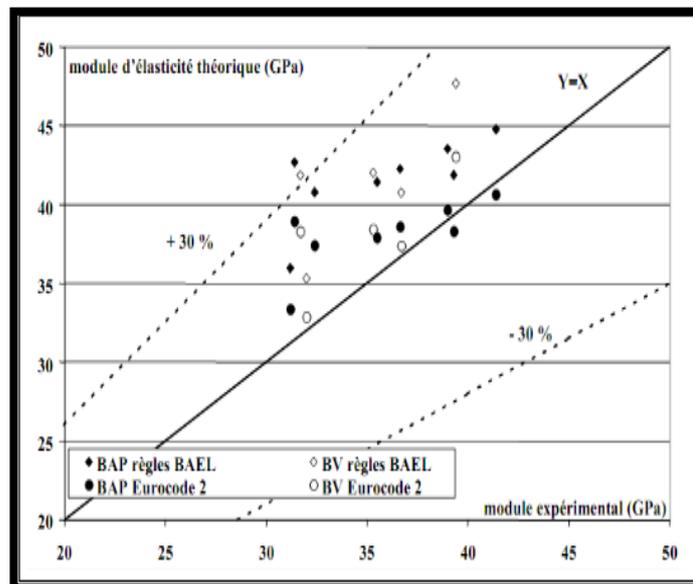
### **I.9.2.2. Résistance à la traction**

En général, la résistance à la traction du BAP est supérieure à celle du BO [72,79]. Cela peut être dû à la teneur élevée en pâte dans le BAP qui induit une déformabilité légèrement supérieure et également dû à une meilleure homogénéité par rapport au béton conventionnel [80]. Le rapport de résistance à la traction/compression du BAP était supérieur de 10 à 30% à celui du BO. Ceci résulte probablement d'une meilleure microstructure du BAP [81].

### I.9.2.3. Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats.

[82]. Si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000 f_{Cj} 1/3$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçants aurait donc le même module qu'un béton vibré or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [83] ont montré que le module est similaire pour les BAP et les BV. De même, König et al. Constatent que les modules des BAP sont très proches de ceux des BV (Figure I-13), d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [84].



**Figure I.13.** Comparaison des modules élastique théoriques de béton autoplaçant (BAP) et de bétons vibrés (BV) Avec leur valeur expérimentale [85].

Rozière et al. [86] montre une diminution du module des BAP avec l'augmentation de volume de la pâte du ciment. [87] a observé une diminution du

module avec l'augmentation du rapport E/L (résultats en accord avec la diminution de la résistance à la compression et la compacité de la matrice.

### **I.10. 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. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.). [88]

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 :

- ✓ Densités de ferrailage importantes ;
- ✓ Formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc.;
- ✓ Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc.;
- ✓ Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- ✓ Exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- ✓ Accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration. [88]

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :

- ✓ Le pont Akashi Kaikyo (Figure I.14), le plus long pont suspendu au monde (391m) où 390000 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration. [88]



**Figure I.14** : Le pont Akashi Kaikyo. [88]

- ✓ La tour Landmark Tower, où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune.



Figure I.15 : La tour Landmark Tower. [88]

### I.11. Les intérêts du BAP

#### Pour la mise en œuvre

- ✓ Diminution du temps de coulée ;
- ✓ Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes » ;
- ✓ Possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles ;
- ✓ Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération ;

#### Sur la qualité du béton :

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

#### Concernant la conception :

- ✓ Permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton ;
- ✓ Possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage [88] ;

### **I.10. Conclusion :**

Dans cette partie de la recherche bibliographique, on a présenté l'historique et les principales propriétés et constituants du BAP ainsi que sa formulation et son utilisation dans le monde.

Les différentes méthodes de formulation sont basées sur différents critères, la comparaison est difficile et nous pourrions dire que suivant les méthodes et vu la sensibilité de la formulation des BAP, les formulateurs doivent établir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour assurer la fluidité du béton mais aussi son homogénéité et jouer sur les dimensions et le volume des gravillons en gardant une certaine limite qui reste à bien définir pour éviter le phénomène de blocage, car la réduction du volume de la pâte et l'utilisation des gravillons de petites dimensions influe négativement sur la résistance mécanique dans la gamme usuelle des bétons.

---

# Chapitre II :

## Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essai

---

## **II.1. Introduction**

L'emploi judicieux des matériaux utilisés dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés, physiques, chimiques, minéralogiques, et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination. Ces connaissances doivent être obtenues en utilisant des techniques expérimentales fiables et normalisées. Une nouvelle méthode appelée "plans d'expériences" va être également utilisée pour l'optimisation des essais de formulation du composite étudié. Tout cela nécessite, donc, d'être clarifié avant de présenter les résultats obtenus. Nous allons consacrer, donc, ce deuxième chapitre à une caractérisation générale des matières premières utilisées et une brève présentation des principales techniques expérimentales et méthodes utilisées

## **II.2. Matières Premières**

Pour commencer, il convient de signaler que le composite étudié est composé de ciment, ajouts minéraux, sable, gravier, eau et éventuellement un adjuvant. La caractérisation générale de tous ces matériaux est présentée en détail ci-dessous :

### **II.2.1. Ciment**

Le ciment utilisé est un ciment de Beskra de type CEM I (CPA 42,5 R), conforme à la norme Algérienne (NA 442-2013), pour les bétons à hautes performances et a une résistance rapide à courte terme. Ses caractéristiques chimiques, minéralogiques et physico-mécaniques sont données dans les tableaux II.1 et II.2.

**Tableau II.1.** Propriétés physico-mécaniques du ciment utilisé.

<b>Caractéristiques</b>	<b>Ciment blanc 52.5</b>
Masse volumique Absolue ( $\rho_s$ ) (Kg/m <sup>3</sup> )	3140
Masse volumique Absolue ( $\rho_a$ ) (Kg/m <sup>3</sup> )	1160
Consistance normale (%)	25.8-26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25-1.0
Début de prise (min)	150-190
Fin de prise (min)	220-250
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	20-29
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	42.5-52.5

**Tableau II.2.** Analyse chimique et minéralogique du ciment utilisé.

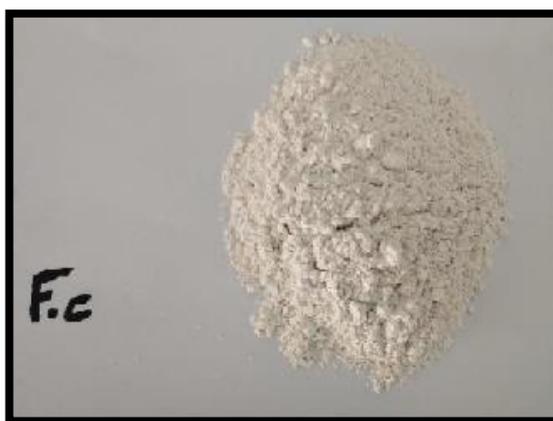
Composant	SO <sub>3</sub>	MgO	(Cl <sup>-</sup> )	Pert au feu	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A
Contenu (%)	2.6-3.7	2.2-2.8	0.03-0.07	2.6-3.7	56-66	5.1-7.2

### II.2.2. Ajouts utilisés

Les ajouts utilisés sont des fines de trois natures différentes : Fumée de silice (**F.S**), fine calcaire (**F.C**), la poussière de fours (**CKD**).

#### II.2.2.1. Fines calcaires (F.C)

Les fines calcaires utilisés viennent de 'Khroub' à la wilaya de Constantine sont de couleur blanche et de nature essentiellement calcaire (Tableau II.3). Elles sont obtenues par tamisage au tamis 10 µm de concassage d'agrégats calcaires (Figure II.1).



**Figure II.1.** Aspect général de la fine de Calcaire (F.C).

**Tableau II.3.** Composition chimique du filler calcaire utilisé.

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

Ces principales caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau II.4.

**Tableau II.4.** Caractéristiques physiques des fines calcaires.

<b>Fine calcaire (F.C)</b>	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.12
	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.70
	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)	5000

### II.2.2.2. Fumé de silice (F.S)

La fumée de silice utilisés viennent de Granitex ‘Oued Smar’ à la wilaya de Alger est de couleur grise et de nature essentiellement de silice. Elles sont obtenues par broyage et tamisage, la taille des particules très fins (Figure II.2).



**Figure II.2.** Aspect général de la fumée de silice (F.S).

Le tableau II.5. Présente les analyses de la composition chimique de la fumée de silice.

**Tableau II.5.** Composition chimique de la fumée de silice utilisé.

Composant	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>
Contenue (%)	> 85	< 2.5	< 0.1

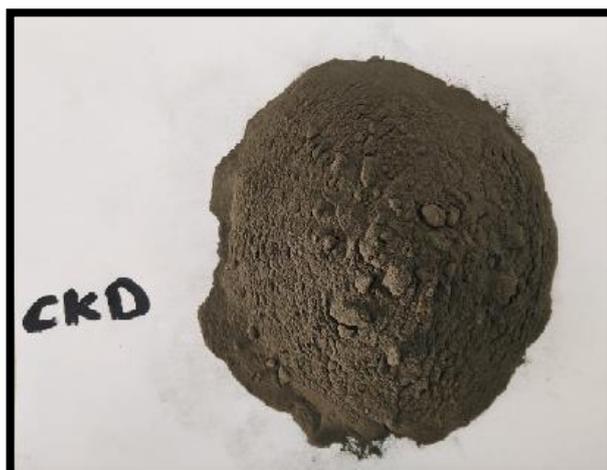
Ces principales caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau II.6.

**Tableau II.6.** Caractéristiques physiques des fines calcaires.

<b>Fumé de silice (F.S)</b>	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.5
	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.3
	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)	> 15

### II.2.2.3. La Poussière de fours (CKD)

Les poussières de four à ciment (CKD) utilisés viennent de la cimenterie de ‘‘Ain Kebira’’ à la wilaya de sétif. La taille des particules de (CKD) est très fins (Figure II.3).



**Figure II.3.** Aspect général de la poussière de fours (CKD).

Le tableau II.7. Présente les analyses de la composition chimique de la poussière de fours (CKD).

**Tableau II.7.** Composition chimique du filler calcaire utilisé.

Composant	SiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl <sup>-</sup>
Contenue (%)	24.1	63.3	0.816	0.96	0.258	1.23	4.66	4.20	0.25	0.175

Ces principales caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau II.8.

**Tableau II.8.** Caractéristiques physiques des fines calcaires.

<b>La poussière de fours (CKD)</b>	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.98
	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.15

### **II.2.3. Sable**

La courbe granulométrique du sable de dune d'Oued Souf utilisé présentée graphiquement dans la Figure II.4, montre que la granularité est continue, étalée et assez régulière, ce qui représente une répartition assez homogène des classes granulaires.

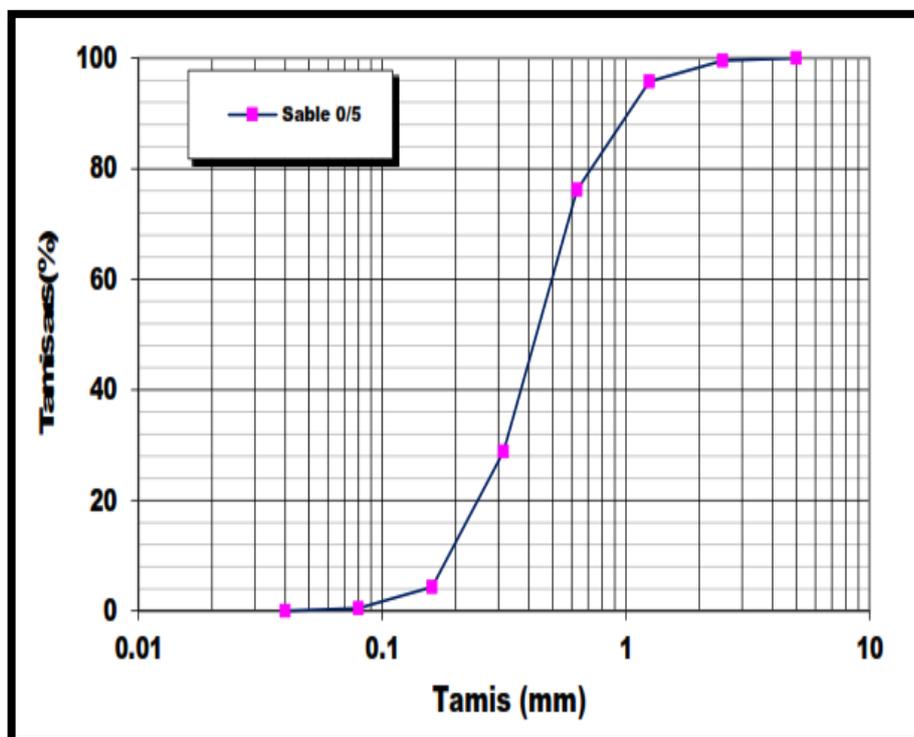


Figure II.4. Courbes granulométriques de sable de dune.

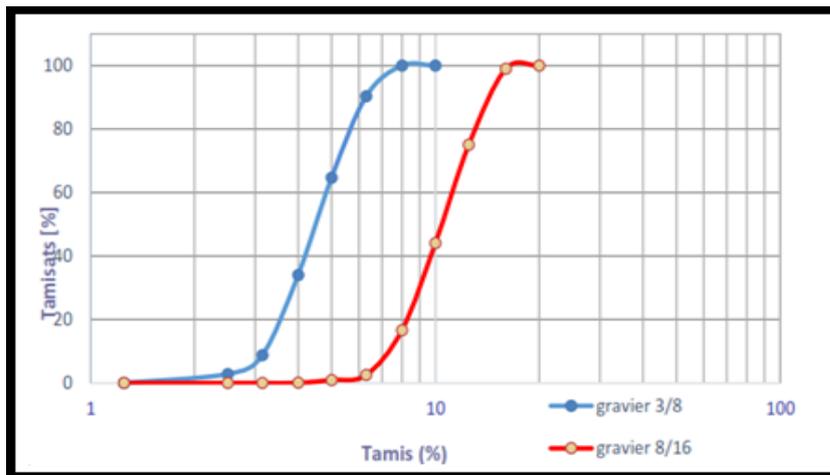
Le tableau II présente également ses caractéristiques physiques.

Tableau II.9. Caractéristiques physiques du sable de dune.

Caractéristique	SD
Densité absolue	2.60
Densité apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.61
Module de finesse	1.95
Equivalent de sable (%)	90
Compacité (%)	57

#### II.2.4. Graviers

Les graviers utilisés dans ce travail sont des graviers de la région de sétif. Les fractions granulaires utilisées sont : Gravier (3-8), Gravier (8-15). Les pourcentages des tamisats cumulés obtenus en fonction des diamètres des grains de ces deux graviers sont représentés sous formes graphiques (figure II.5).



**Figure II.5.** Courbes granulométriques des graviers de fraction 3/8 et 8/15.

Le tableau II.10. Présente également ses caractéristiques physiques de G (3/8).

**Tableau II.10.** Caractéristiques physiques du G (3/8).

Caractéristique	G (3/8)
Densité absolue	2.60
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.33
Module de finesse	1.95
Equivalent de G (3/8) (%)	90
Compacité (%)	51
Los Angeles (LA) (%)	15.16

Le tableau II.11. Présente également ses caractéristiques physiques de G (8/16).

**Tableau II.11.** Caractéristiques physiques du G (8/16).

Caractéristique	G (8/16)
Densité absolue	2.60
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.33
Module de finesse	1.95
Equivalent de G (8/16) (%)	90
Compacité (%)	51
Los Angeles (LA) (%)	15.16

### **II.2.5. Adjuvant**

L'adjuvant employé dans cette étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération pour bétons prêts à l'emploi appelé MEDAFLOW RE 25, commercialisé par la société Granitex située à Alger.

Il est sous forme de liquide et d'une couleur jaunâtre, conforme à la norme EN 934-2 [AFONR, 2002] et conçu à base de polycarboxylates.

La densité, le pH et l'extrait sec du superplastifiant sont respectivement 1.07, 6.5 et 30 %.

MEDAFLOW-RE 25 permet de diminuer le rapport 'Eau/Ciment' (E/C) tout en améliorant considérablement la fluidité du béton.

Il permet aussi d'augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et à long terme. La plage de dosage recommandée du MEDAFLOW-RE 25 est de 1 à 2.5 %.

Toutefois, le dosage optimal doit être recherché selon le type de béton et les propriétés recherchées par la réalisation des gâchés au laboratoire.

### **II.2.6. Eau**

L'eau qui a été utilisée pour le gâchage est une eau potable sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7.

Les caractéristiques physico-chimiques sont les suivantes :

**Tableau II.12.** Analyse physico-chimique de l'eau.

<b>Paramètre</b>	<b>Quantité</b>	<b>Commentaire</b>
<b>PH</b>	7	Acceptable pour le gâchage
<b>Conductivité</b>	1250 $\mu$ s/cm	-
<b>Taux (Cl<sup>-</sup>)</b>	0.24 mg/l	0.05 à 0.50
<b>Taux de (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>	0.15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
<b>Taux de (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	1.8 mg/l	< à la concentration max (50)
<b>Turbidité</b>	1.44 NTU	-
<b>Dureté</b>	6.72 °F	15-50
<b>Résidu sec</b>	100 mg/l	-

### **II.3. Méthode et essais**

#### **II.3.1. Préparation de mélange**

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatiques cubiques 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 superplastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- ✓ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marbre) et les introduire dans le malaxeur.
- ✓ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec. Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- ✓ Ajouter la trois quart d'eau graduellement.
- ✓ 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.

La procédure à suivre pour mettre en place un BAP est décrite comme suivant [NA EN12390 - 2] :

- ✓ Introduire gravier 8/16, ciment, sable 0/5 et gravier 3/8.
- ✓ Malaxer pendant 1 min et 30 secs
- ✓ Introduire la quantité d'eau.

Malaxer pendant 3 min et ajouter l'eau tout attentivement.

- ✓ Mesurer l'étalement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré et visé.
- ✓ Le temps total de malaxage est de 4 min et 30 secs.
- ✓ Les différentes éprouvettes de bétons préparées, sont conservées dans une salle pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes de béton obtenues sont conservées dans l'eau du robinet pendant 28 jours.

### **II.3.2. Essais de caractérisation des BAP**

Dans la suite de notre travail, seront présentés 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.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

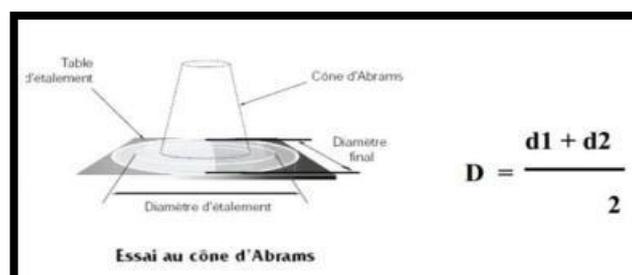
- ❖ Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).
- ❖ Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- ❖ Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

#### **II.3.2.1. Méthodes de caractérisation du BAP à l'état frais**

##### **II.3.2.1.1. 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. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre.

Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.



**Figure II.6.** Essai au cône d'Abrams.

**✚ Essai d'étalement (slump flow)**

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

**✚ Matériel nécessaire**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté.
- 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.

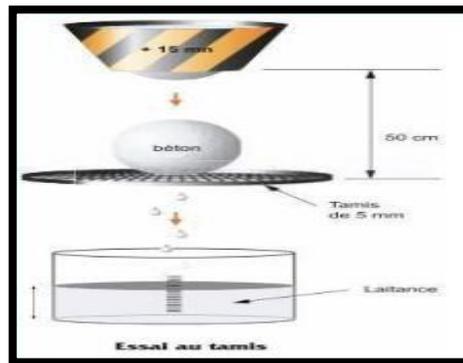
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux côtés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple :(68/70cm). Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doivent être invalidé et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.



**Figure II.7.** Essai d'étalement.

### II.3.2.1.2. Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.



**Figure II.8.** Essai au tamis.

#### **Objet de l'essai**

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

#### **Matériel utilisé**

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



**Figure II.9.** Stabilité au tamis.

 **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  $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$  ;
- ✓ Noter le poids de l'échantillon ;
- ✓ Attendre 2 mn ;
- ✓ Peser le fond avec la laitance on a :  $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond + laitance}} - P_{\text{fond}}$ .
- ✓ Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.
- ✓  $P = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) * 100$ .

 **Critères d'acceptabilité**

Les critères qui suivent sont particulièrement adaptés aux applications de béton autoplaçant en éléments verticaux. La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçant de la façon :

- ✓  $0\% = \% P_{\text{laitance}} = 15\%$  **stabilité satisfaisante.**
  - ✓  $15\% < \% P_{\text{laitance}} = 30\%$  **stabilité critique** (essai de ségrégation à réaliser in situ).
  - ✓  $\% P_{\text{laitance}} > 30$  **stabilité très mauvaise** (ségrégation systématiquement, béton inutilisable).
- Par ailleurs, la détection d'eau de ressuage lors de l'essai n'est pas acceptable. Cela induit des risques de tassement, de délavage du parement et d'altération de la perméabilité

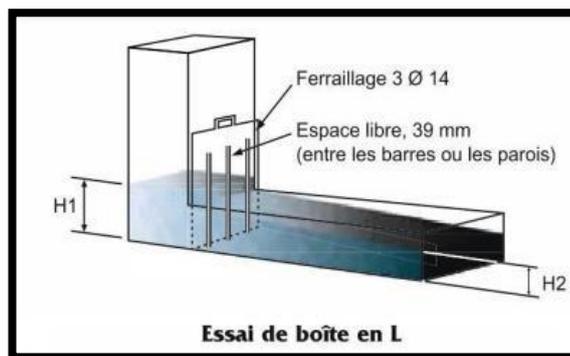
### **II.3.2.1.3. Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]**

La cohésion armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticale ( $H_1$ ) et horizontale ( $H_2$ ). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H_2/H_1$ . Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.

### **Objectif de la boîte en L**

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



**Figure II.10.** Essai de boîte en L.

### **Mode opératoire**

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  (figure II.10) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H_2/H_1$ . 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. A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton.

## **II.4. Confection des éprouvettes**

### **II.4.1. Type et tailles des moules**

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme :

- Des moules de compressions cubique (10x10x10) cm et de flexion prismatique (7x7x28) cm.

#### **II.4.1.2. Conservation des éprouvettes**

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

#### **II.4.1.3. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci :**

##### **II.4.3.1. Essai compression [NF EN 206-1]**

###### **+ But de l'essai**

- Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.
- L'essai se fait sur une éprouvette cubique de dimensions normalisées (10x10x10) cm<sup>3</sup>.

###### **+ Principe de l'essai**

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cylindrique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches bien vibrées chacune.
- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20 °C.
- Le démoulage se fera après un 24 heures. Généralement, la résistance est déterminée à 28 jours.



**Figure II.11.** L'appareil de compression.

### Conduite de l'essai

- ✓ Ce temps écoulé, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de béton.
- ✓ Eprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on élèvera une seule lecture. Celle de la force correspondant à la rupture de l'échantillon. Soit F cette lecture.

#### ❖ Calculs :

La résistance à la compression sera :  $R_c = F / S$  ;

S : section de l'éprouvette : (100 x100) mm<sup>2</sup>.

F : force au moment de la rupture (N).

et essai se fait également sur les roches que l'on doit tailler au préalable sous forme de cubes d'arête égale à 10 cm.

#### **II.4.3.2. Essai de traction par flexion [NF P18-408] :**

##### ✓ **But de l'essai**

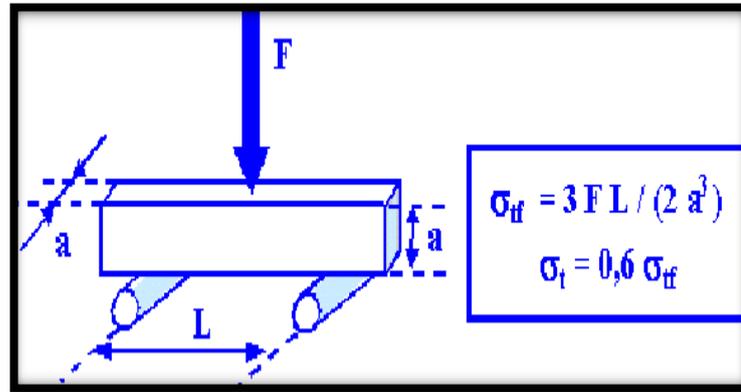
Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton. C'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prisme (7x7x28) cm<sup>3</sup> de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.



**Figure II.12. Essai de traction par flexion.**

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  $\sigma_{ff}$  (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 t un terme correctif de 0,6 ( $\sigma_t = 0,6 \sigma_{ff}$ ).



**Figure II.13.** Formule de calcul de la résistance de traction.

#### II.4.3.3. Essai d'absorption d'eau

L'essai a été effectué conformément à la norme ASTM C 642-06. Les éprouvettes ont été immergées dans de l'eau à une température de 29 °C pendant vingt-quatre (24) heures. Par la suite, les échantillons ont été égouttés avec une serviette pendant dix (10) minutes pour éliminer l'excès d'eau.

L'absorption / absorption d'eau a été déterminée à l'aide de l'équation.

$$\frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

$W_1$  = Poids de l'échantillon avant immersion dans l'eau.

$W_2$  = poids de l'échantillon après immersion dans l'eau.

#### II.4.3.4. La méthode des plans d'expériences

La formulation des bétons autoplaçants est une opération plus complexe que celle des bétons classiques parce que le nombre de ses constituants est plus élevé. Donc, dans la formulation de ce type de béton, on doit prendre en considération l'assurance d'une bonne combinaison entre les matériaux utilisés et de rechercher le dosage convenable de chacun de ces constituants.

Dans le but de comprendre le rôle joué par les différents constituants, il est nécessaire d'effectuer une étude paramétrique. Généralement, la démarche d'une étude paramétrique classique est basée sur la variation de chaque paramètre séparément afin d'observer son influence sur l'évolution des propriétés étudiées.

Donc, cette démarche ne peut pas prendre en considération toutes les interactions possibles entre les effets des constituants et ne permet pas d'établir l'ordre d'importance des paramètres sur les propriétés étudiées.

De ce fait, une démarche expérimentale capable de prendre en considération l'effet de chaque paramètre séparément et en interactions entre plusieurs paramètres sur les propriétés étudiées est vraiment nécessaire, tout en effectuant le minimum nombre possible d'essais aux laboratoires. L'une des méthodes les plus connues est la méthode des plans d'expériences. Grâce à une approche statistique, cette dernière permet de conduire un nombre bien déterminé d'essais et d'avoir des résultats capables de dévoiler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interactions avec d'autres paramètres. Le détail de cette méthode telle qu'elle a été utilisée dans le présent travail est donné au chapitre III.

## **II.5. Conclusion**

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

---

# Chapitre III :

## Résultats et discussions

---

### **III.1. Introduction :**

La méthode des plans d'expériences est une méthodologie puissante qui permet grâce à une approche statistique, de conduire un nombre bien déterminé d'essais et d'avoir des résultats permettant de dévoiler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interactions avec d'autres paramètres.

Ce chapitre a comme objectif principal de montrer la faisabilité d'utiliser les approches expérimentales basées sur les plans d'expériences pour établir une modélisation des réponses obtenues en fonction des paramètres de l'étude.

La modélisation a été réalisée grâce à un logiciel d'analyse statistique Expert design de Statistical American Systems SAS-Istitute.

Ce logiciel Expert design qui accompagne notre recherche est la version la plus récente du logiciel des plans d'expériences, édité par SAS (Statistical American Systems). Il permet de réaliser facilement les calculs et de tracer les diagrammes des exemples d'applications présentés.

### **III.2. Les plans d'expériences**

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [114]. 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<sub>i</sub>'. En général, il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y = f(x_i) \quad \text{(III.1)}$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur [89].

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.

Par ailleurs, les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange [90]. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%.

Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part.

Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants. Par exemple, la concentration d'un produit doit être au moins de 'x' pour-cent où cette concentration ne peut excéder une valeur donnée. En fonction de ces contraintes la planification de l'étude est modifiée et elle doit être adaptée à chaque cas.

Si l'on note par 'x' la teneur en constituant 'i', la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait la relation :

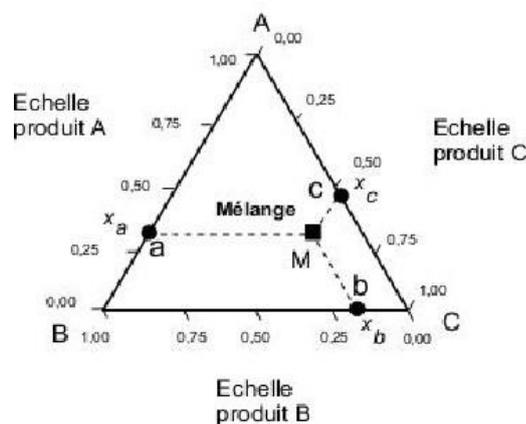
$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \quad \text{(III.2)}$$

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité on a :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 1 \quad \text{(III.3)}$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges. Les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes de celles utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés. Pour la représentation géométrique des mélanges à (03) composants, on utilise un triangle équilatéral (Figure III.1).

Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral (A, B ou C). Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle (AB, BC ou AC). Par exemple, le côté AB du triangle (Figure III.1) représente les mélanges composés uniquement des produits A et B.



**Figure III.1.** Représentation des mélanges à (03) constituants sur un triangle équilatéral [89].

Un point (M) de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle. Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent que la contrainte fondamentale des mélanges est bien respectée.

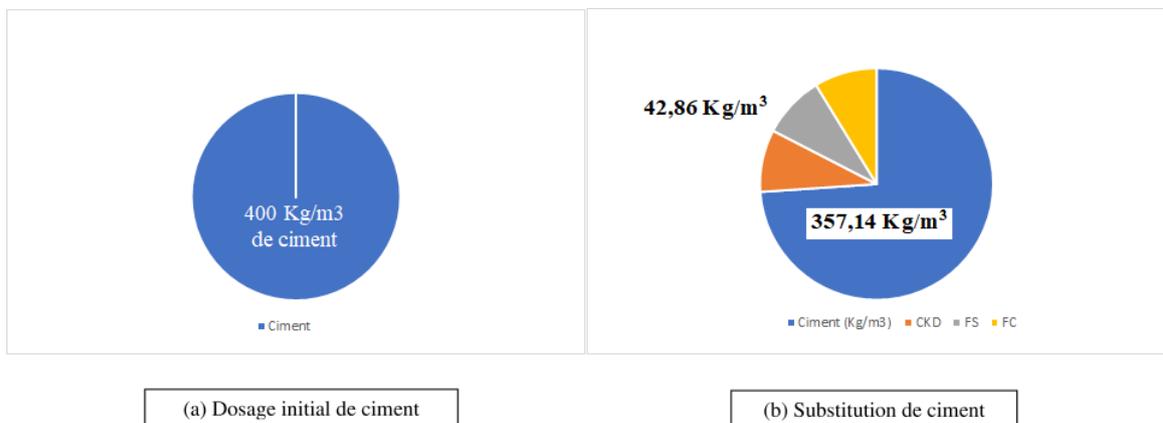
### III.3. Formulation de la composition de base

Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement au béton autoplaçant qui a un étalement supérieur à 60 cm.

Notre programme expérimental a permis de comprendre le rôle joué par les différents paramètres séparément (la poussière de fours (CKD), Fumée de silice (FS), Fins calcaire (FC)) sur les propriétés de béton autoplaçant.

Ainsi, nous aurons à traiter un plan de mélange à 3 facteurs (CKD, FS et FC) pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution du ciment qui va jusqu'à 12 % (42.86 kg/m<sup>3</sup> de ciment) (Figure III.2) ; ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est donc contraint par la relation suivante :

$$\% \text{ CKD} + \% \text{ FS} + \% \text{ FC} = 100 \% \quad (\text{III.4})$$



**Figure III.2.** Substitution de ciment par des ajouts de minéraux.

Le nombre d'expériences générés par le logiciel est calculé par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \quad (\text{III.5})$$

où :

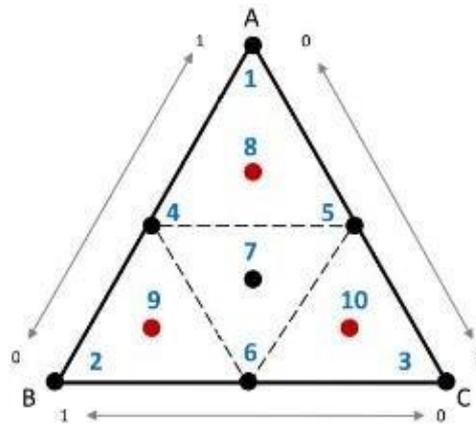
‘q’ est le nombre de facteurs, et ‘m’ le nombre de niveaux.

Avec 3 facteurs et 3 niveaux, un plan de mélange comprenant 10 compositions a été préparé pour évaluer l'influence de ces trois facteurs sur les caractéristiques du BAP étudié. Le modèle à priori s'écrit sous la forme  $Y = f(x_i)$  où la fonction ' f ' est un développement polynomial d'ordre plus ou moins élevé des '  $x_i$  ', l'ordre du polynôme dépend du degré de précision souhaité. Dans cette étude, un modèle polynomial d'ordre 03 a été utilisé à trois variables non indépendants (**CKD**, **FS** et **FC**) et 03 niveaux. Le modèle est exprimé comme suit :

$$Y = a_1 x \text{CKD} + a_2 x \text{FS} + a_3 x \text{FC} + a_4 x (\text{CKD.FS}) + a_5 x (\text{CKD.FC}) + a_6 x (\text{FS.FC}) \quad (\text{III.6})$$

Où : Y est la réponse et ( $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ ) sont les coefficients du modèle qu'il faut identifier et expriment l'effet de la réponse à chaque facteur et à chaque interaction.

La figure III.3 représente un réseau triangulaire des 21 combinaisons étudiées :



**Figure III.3.** Représentation triangulaire des 10 combinaisons étudiées à trois constituants.

Les proportions de ces facteurs d'expérience générés par le logiciel sont présentées dans le tableau III.1.

**Tableau III.1.** Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.

Mélange	CKD (%)	F.S (%)	F.C (%)
1	0	1	0
2	0.5	0	0.5
3	0.167	0.167	0.667
4	0.5	0.5	0
5	0.333	0.333	0.333
6	0.667	0.167	0.167
7	0	0.5	0.5
8	0	0	1
9	1	0	0
10	0.167	0.667	0.167

Dans notre cas les réponses souhaitées sont l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement au boîte L, la stabilité des tamis, la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

Les résultats obtenus des réponses sont ensuite injectés dans le logiciel "Expert design". Ils sont représentés par des diagrammes ternaires reliant les constituants de la matrice, à savoir la poussière de fours (CKD), la fumée de silice (FS) et les fillers calcaires (FC), avec les réponses étudiées et qui ont fait ressortir les constituants prépondérants de la matrice. Les mêmes diagrammes nous ont permis aussi d'optimiser la composition de référence des BAP.

Tous les mélanges ont été donc élaborés en se basant sur ces trois composants, issus par l'utilisation du logiciel de statistique Expert design en utilisant un mélange ternaire du liant.

On trouve le dosage des granulats (Gravier (3/8), Gravier (8/16) et de Sable (0/5)) par le rapport (G/S = 0.9).

Les compositions ainsi obtenues sont résumées dans le tableau III.2 selon leurs ordres de préparations dans le laboratoire après la randomisation des essais.

**Tableau III.2.** Formulations des mélanges selon un plan de mélange.

CKD (Kg/m <sup>3</sup> )	F.S (Kg/m <sup>3</sup> )	F.C (Kg/m <sup>3</sup> )	Liant (Kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	E/L	Eau (l/m <sup>3</sup> )	G/S	SP (Kg/m <sup>3</sup> )	G (3/8) (Kg/m <sup>3</sup> )	G (8/16) (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable (Kg/m <sup>3</sup> )
0	42.860	0	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	286.367	531.824	909.103
21.430	0	21.430	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	288.260	535.341	915.114
7.157	7.157	28.587	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	287.693	534.288	913.315
21.430	21.430	0	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	287.558	534.038	912.886
14.286	14.286	14.286	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	287.350	534.170	913.113
28.587	7.157	7.157	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	288.183	535.197	914.868
0	21.430	21.430	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	287.070	533.130	911.334
0	0	42.860	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	287.772	534.433	913.563
42.860	0	0	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	288.749	536.249	916.666
7.157	28.587	7.157	400	357.14	0.40	160	0.9	3.60	286.991	532.983	911.086

#### II.4. Exploitation des résultats du plan de mélange

Les résultats des 10 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois facteurs (CKD : Poussières de fours, FS : Fumée de silice, FC : Fines Calcaires) peuvent bien exploiter les 10 compositions dans l'élaboration des modèles mathématiques décrivant l'effet de type d'ajout sur les propriétés des BAP. Ces modèles ont facilité la visualisation de l'effet de chaque ajout séparément et en combinaison avec d'autres types d'ajout sur les propriétés des BAP, par des diagrammes ternaires avec des courbes iso-réponses.

Les résultats obtenus lors des essais sont recueillis dans le tableau III.3.

**Tableau III.3.** Résultats des essais de caractérisation.

Mélange	Rc <sub>7j</sub> (MPa)	Rc <sub>14j</sub> (MPa)	Rc <sub>28j</sub> (MPa)	Rf <sub>7j</sub> (MPa)	Rf <sub>14j</sub> (MPa)	Rf <sub>28j</sub> (MPa)	Abs (%)	E <sub>tta</sub> (Cm)	Boite L (%)	Stabilité des tamis (%)
1	51.260	59.935	62.485	4.375	4.965	5.901	2.656	58	94	13.45
2	46.416	50.500	58.934	3.851	4.467	4.672	2.846	71	88	11.35
3	41.963	43.420	48.161	3.431	4.180	4.274	3.416	68	94	10.95
4	52.918	58.854	67.097	4.207	4.778	5.333	2.590	66	100	8.37
5	46.796	56.175	61.463	3.635	4.465	5.654	3.253	58	82	11.25
6	54.569	57.577	61.144	4.485	4.867	5.613	0.496	63	90	7.02
7	45.619	64.415	67.486	4.784	5.400	5.959	0.293	58	100	6.14
8	46.475	52.735	55.937	4.350	4.538	4.888	0.400	65	100	8.93
9	50.715	58.500	59.726	3.575	4.484	5.424	0.340	58	85	7.08
10	48.641	55.811	58.978	4.321	5.467	6.279	0.320	63	90	7.08

Une analyse de la variance (**ANOVA**) permet de dissocier les différents effets étudiés à partir de la variance de la réponse mesurée et permet aussi de voir qu'elle est la contribution des facteurs à la variabilité de la réponse.

#### III.4.1. Etalement

**Tableau III.4.** ANOVA pour l'Etalement.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
<b>Model</b>	163.74	6	27.29	2.16	0.2812	not significant
<b>Linear Mixture</b>	48.11	2	24.06	1.91	0.2923	
<b>AB</b>	43.90	1	43.90	3.48	0.1590	
<b>AC</b>	63.53	1	63.53	5.03	0.1106	
<b>BC</b>	4.97	1	4.97	0.39	0.5748	
<b>ABC</b>	27.54	1	27.54	2.18	0.2361	
<b>Residual</b>	37.86	3	12.62			
<b>Cor Total</b>	201.60	9				
<b>Std. Dev.</b>			3.55	<b>R-Squared</b>		0.8122
<b>Mean</b>			62.80	<b>Adj R-Squared</b>		0.4366
<b>C.V. %</b>			5.66	<b>Pred R-Squared</b>		-3.3800
<b>PRESS</b>			883.00	<b>Adeq Precision</b>		4.685

La "valeur F du modèle" de 2,16 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 28,12 % de chances qu'une « valeur F du modèle » aussi élevée se produise en raison du bruit. Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Votre rapport de 4,685 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (l'affaissement) :

$$\text{Etalement, (cm)} = + 57.47 * A + 58.65 * B + 65.92 * C + 32.24 * A * B + 38.79 * A * C - 10.85 * B * C - 168.35 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.4) :

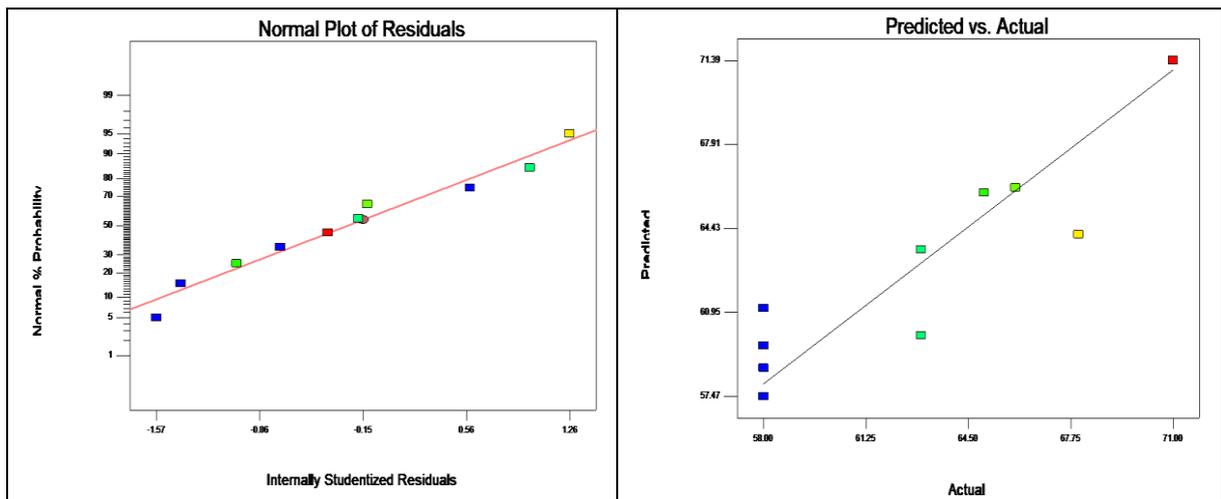


Figure III.4. Graphique de distribution de probabilité normale pour l'Etalement.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.5).

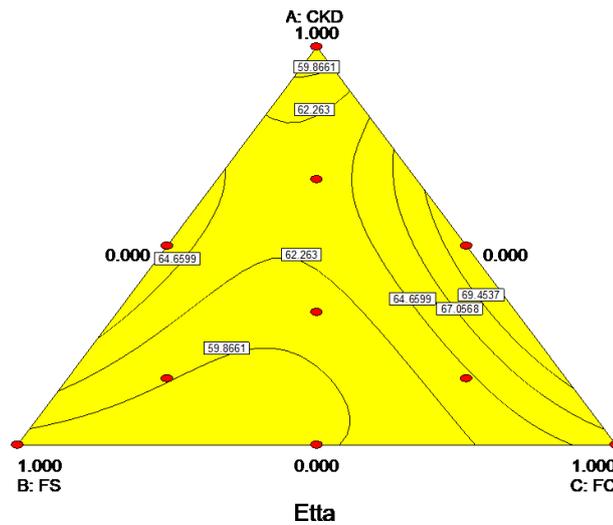


Figure III.5. Courbes iso-réponses de l'Étalement.

### III.4.2. Boite L

Tableau III.5. ANOVA pour la Boite L.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
<b>Model</b>	335.90	6	55.98	4.64	0.1178	not significant
<b>Linear Mixture</b>	115.11	2	57.56	4.77	0.1170	
<b>AB</b>	74.82	1	74.82	6.20	0.0885	
<b>AC</b>	9.05	1	9.05	0.75	0.4503	
<b>BC</b>	5.63	1	5.63	0.47	0.5436	
<b>ABC</b>	125.93	1	125.93	10.43	0.0482	
<b>Residual</b>	36.20	3	12.07			
<b>Cor Total</b>	372.10	9				
<b>Std. Dev.</b>			3.47	<b>R-Squared</b>		0.9027
<b>Mean</b>			92.30	<b>Adj R-Squared</b>		0.7081
<b>C.V. %</b>			3.76	<b>Pred R-Squared</b>		-1.8766
<b>PRESS</b>			1070.40	<b>Adeq Precision</b>		5.661

La "valeur F du modèle" de 4,64 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 11,78 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, ABC sont des termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie),

la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Votre

un rapport de 5,661 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Boite L) :

$$\text{Boite L} = + 85.98 * A + 93.07 * B + 100.70 * C + 42.09 * A * B - 14.64 * A * C + 11.55 * B * C - 360.00 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.6) :

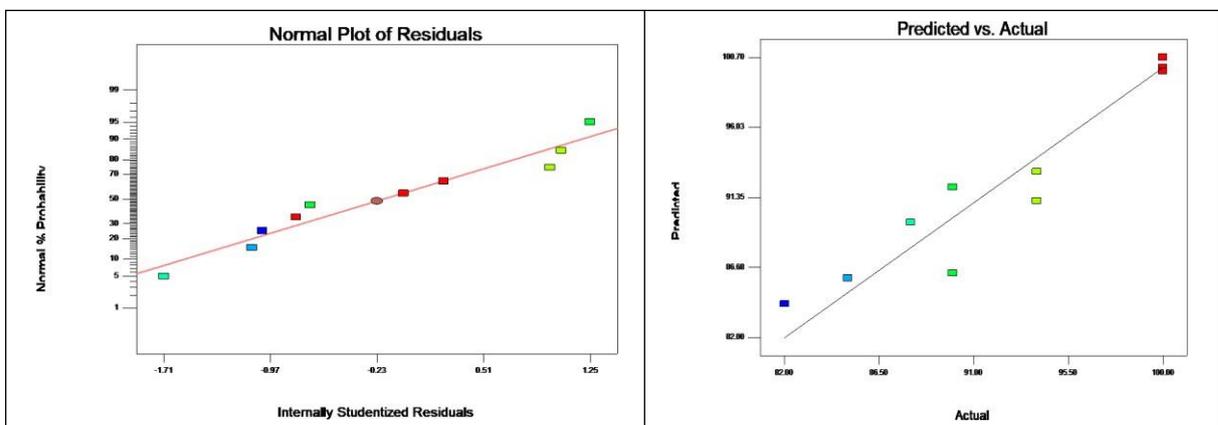


Figure III.6. Graphique de distribution de probabilité normale pour l'Etalement.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.7).

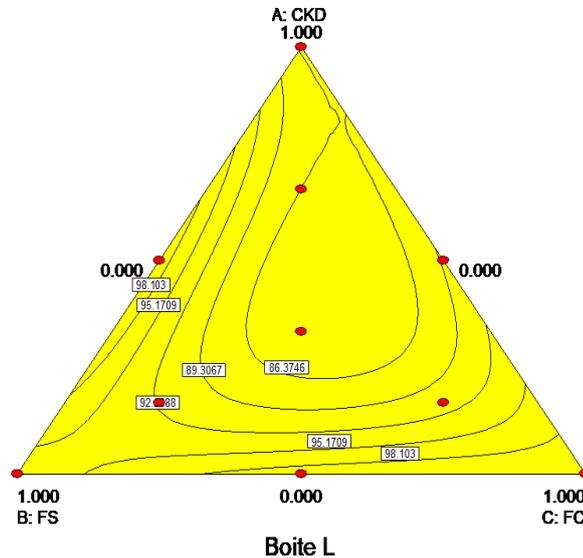


Figure III.7. Courbes iso-réponses de Boite L.

#### III.4.3. Stabilité des tamis (%)

Tableau III.6. ANOVA pour la Stabilité des tamis.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
<b>Model</b>	38.98	6	6.50	1.32	0.4439	not significant
<b>Linear Mixture</b>	5.09	2	2.54	0.51	0.6423	
<b>AB</b>	4.01	1	4.01	0.81	0.4340	
<b>AC</b>	7.82	1	7.82	1.58	0.2974	
<b>BC</b>	17.15	1	17.15	3.47	0.1593	
<b>ABC</b>	2.78	1	2.78	0.56	0.5078	
<b>Residual</b>	14.82	3	4.94			
<b>Cor Total</b>	53.80	9				
<b>Std. Dev.</b>			2.22		<b>R-Squared</b>	0.7246
<b>Mean</b>			9.16		<b>Adj R-Squared</b>	0.1738
<b>C.V. %</b>			24.26		<b>Pred R-Squared</b>	-7.2036
<b>PRESS</b>			441.37		<b>Adeq Precision</b>	3.603

La "valeur F du modèle" de 1,32 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 44,39 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 3,60 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Stabilité des tamis) :

$$\text{Stabilité des tamis (\%)} = + 6.58 * A + 12.86 * B + 9.54 * C - 9.74 * A * B + 13.61 * A * C - 20.15 * B * C + 53.46 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.8) :

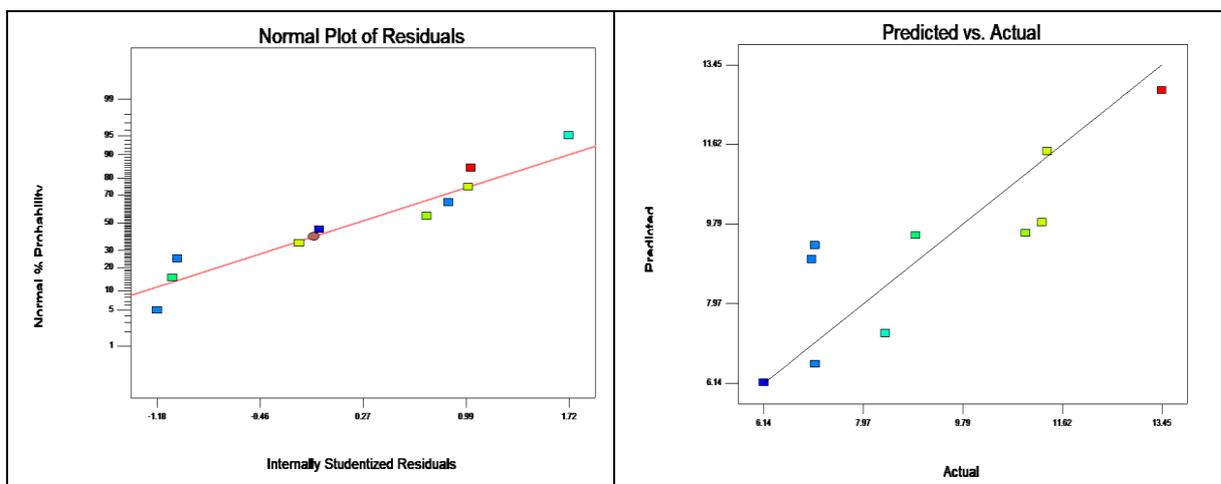


Figure III.8. Graphique de distribution de probabilité normale pour Stabilité des tamis.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.9).

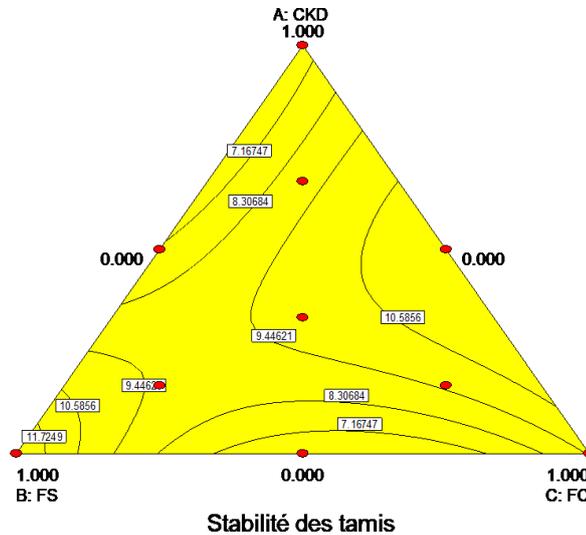


Figure III.9. Courbes iso-réponses de la stabilité des tamis.

#### III.4.4. Résistance à la compression (MPa)

##### III.4.4.1. Résistance à la compression à 7 jours

Tableau III.7. ANOVA pour la résistance à la compression à 7 jours.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
<b>Model</b>	98.05	6	16.34	1.48	0.4030	not significant
<b>Linear Mixture</b>	75.28	2	37.64	3.40	0.1694	
<b>AB</b>	4.28	1	4.28	0.39	0.5780	
<b>AC</b>	2.67	1	2.67	0.24	0.6568	
<b>BC</b>	10.05	1	10.05	0.91	0.4111	
<b>ABC</b>	0.41	1	0.41	0.037	0.8604	
<b>Residual</b>	33.21	3	11.07			
<b>Cor Total</b>	131.26	9				
<b>Std. Dev.</b>			3.33		<b>R-Squared</b>	0.7470
<b>Mean</b>			48.54		<b>Adj R-Squared</b>	0.2410
<b>C.V. %</b>			6.85		<b>Pred R-Squared</b>	-8.2288
<b>PRESS</b>			1211.38		<b>Adeq Precision</b>	3.480

La "valeur F du modèle" de 1,48 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 40,30 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 3,48 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Résistance à la compression à 7 jours) :

$$\text{Résistance à la compression à 7 jours (MPa)} = + 52.10 * A + 51.05 * B + 45.47 * C + 10.07 * A * B - 7.96 * A * C - 15.42 * B * C - 20.43 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.10) :

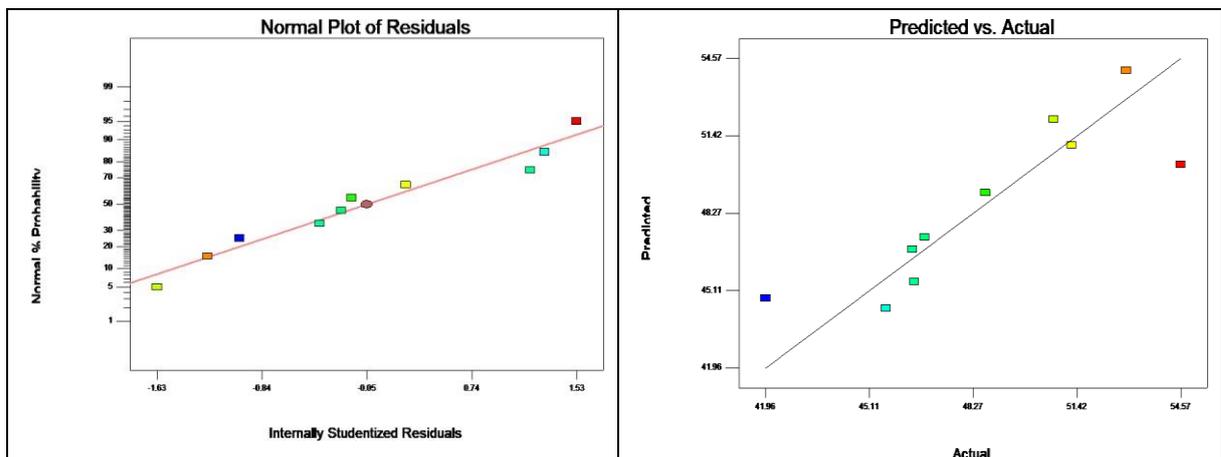


Figure III.10. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 7 jours.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.11).

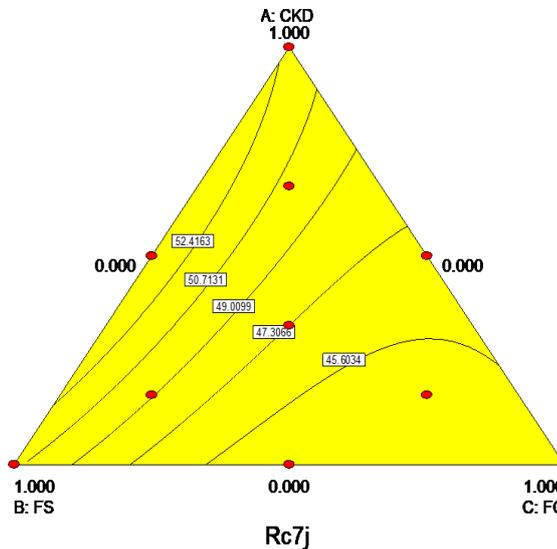


Figure III.11. Courbes iso-réponses de résistance à la compression à 7 jours.

#### III.4.4.2. Résistance à la compression à 14 jours

Tableau III.8. ANOVA pour la résistance à la compression à 14 jours.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	186.64	6	31.11	0.81	0.6240	not significant
Linear Mixture	103.66	2	51.83	1.35	0.3822	
AB	0.026	1	0.026	6.715E-004	0.9810	
AC	20.75	1	20.75	0.54	0.5158	
BC	30.49	1	30.49	0.79	0.4388	
ABC	16.07	1	16.07	0.42	0.5640	
Residual	115.34	3	38.45			
Cor Total	301.98	9				
Std. Dev.		6.20		R-Squared		0.6180
Mean		55.79		Adj R-Squared		-0.1459
C.V. %		11.11		Pred R-Squared		-10.7396
PRESS		3545.14		Adeq Precision		2.320

La "valeur F du modèle" de 0,81 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 62,40 % de chances qu'une « valeur F du modèle » aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 2,32 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Résistance à la compression à 14 jours) :

$$\text{Résistance à la compression à 14 jours (MPa)} = + 60.00 * A + 59.56 * B + 50.39 * C + 0.78 * A * B - 22.16 * A * C + 26.87 * B * C - 128.61 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.12) :

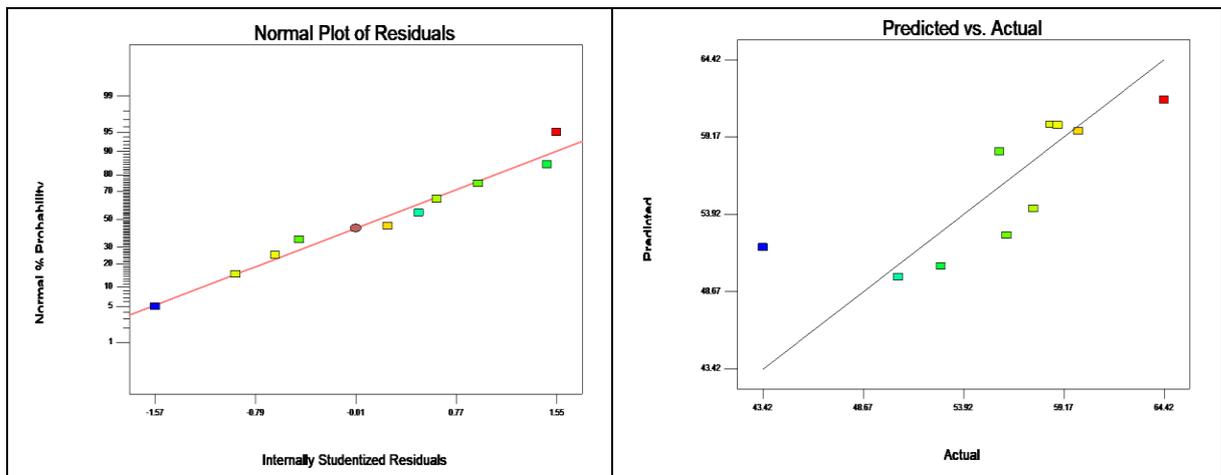


Figure III.12. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 14 jours.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.13).

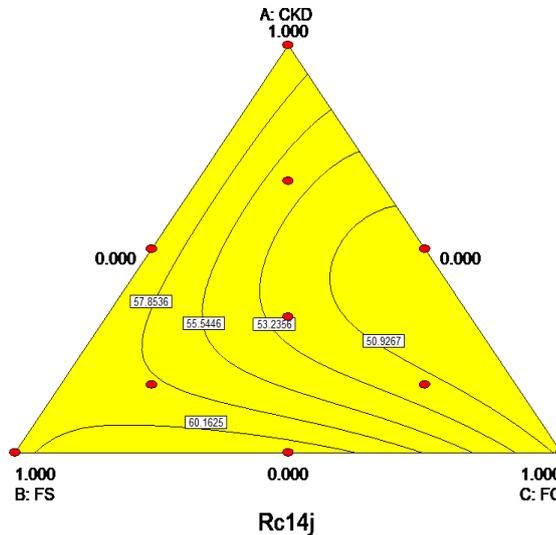


Figure III.13. Courbes iso-réponses de résistance à la compression à 14 jours.

#### III.4.4.3. Résistance à la compression à 28 jours

Tableau III.9. ANOVA pour la résistance à la compression à 28 jours.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	159.45	6	26.57	0.69	0.6802	not significant
Linear Mixture	87.64	2	43.82	1.14	0.4283	
AB	26.53	1	26.53	0.69	0.4670	
AC	0.22	1	0.22	5.730E-003	0.9444	
BC	32.49	1	32.49	0.85	0.4257	
ABC	48.81	1	48.81			
Residual	115.31	3	38.44			
Cor Total	274.76	9				
Std. Dev.		6.20		R-Squared		0.5803
Mean		60.14		Adj R-Squared		-0.2590
C.V. %		10.31		Pred R-Squared		-10.1026
PRESS		3050.54		Adeq Precision		2.671

La "valeur F du modèle" de 0,69 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 68,02 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 2,67 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Résistance à la compression à 28 jours) :

$$\text{Résistance à la compression à 28 jours (MPa)} = + 60.81 * A + 61.95 * B + 53.79 * C + 25.07 * A * B + 2.28 * A * C + 27.74 * B * C - 224.13 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.14) :

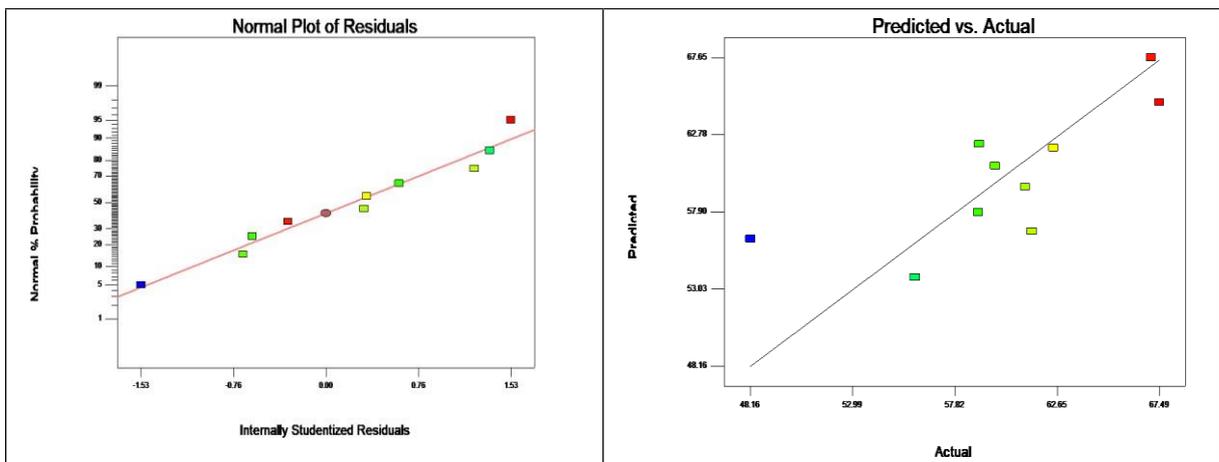


Figure III.14. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 28 jours.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.15).

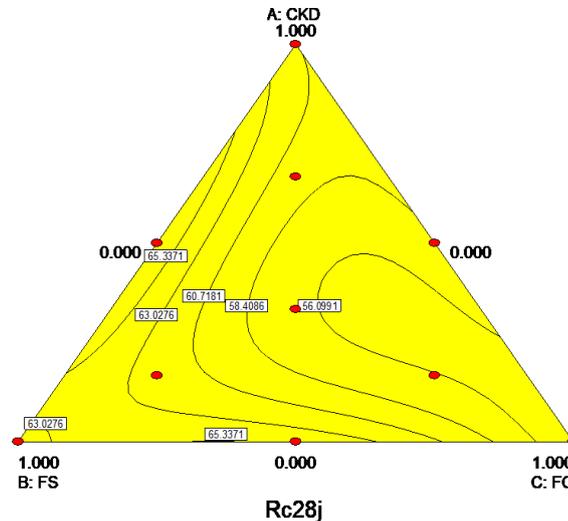


Figure III.15. Courbes iso-réponses de résistance à la compression à 28 jours.

### III.4.5. Résistance à la flexion

#### III.4.5.1. Résistance à la flexion à 7 jours

Tableau III.10. ANOVA pour la résistance à la flexion à 7 jours.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	0.85	6	0.14	0.44	0.8178	not significant
Linear Mixture	0.47	2	0.23	0.73	0.5513	
AB	0.082	1	0.082	0.26	0.6479	
AC	6.639E-003	1	6.639E-003	0.021	0.8947	
BC	0.075	1	0.075	0.23	0.6622	
ABC	0.27	1	0.27	0.84	0.4270	
Residual	0.96	3	0.32			
Cor Total	1.82	9				
Std. Dev.			0.57			R-Squared 0.4699
Mean			4.10			Adj R-Squared -0.5903
C.V. %			13.81			Pred R-Squared -18.1358
PRESS			34.75			Adeq Precision 1.796

La "valeur F du modèle" de 0,44 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 81,78 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 1,80 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Résistance à la flexion à 7 jours) :

$$\text{Résistance à la flexion à 7 jours (MPa)} = + 3.79 * A + 4.39 * B + 4.16 * C + 1.39 * A * B - 0.40 * A * C + 1.33 * B * C - 16.66 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.16) :

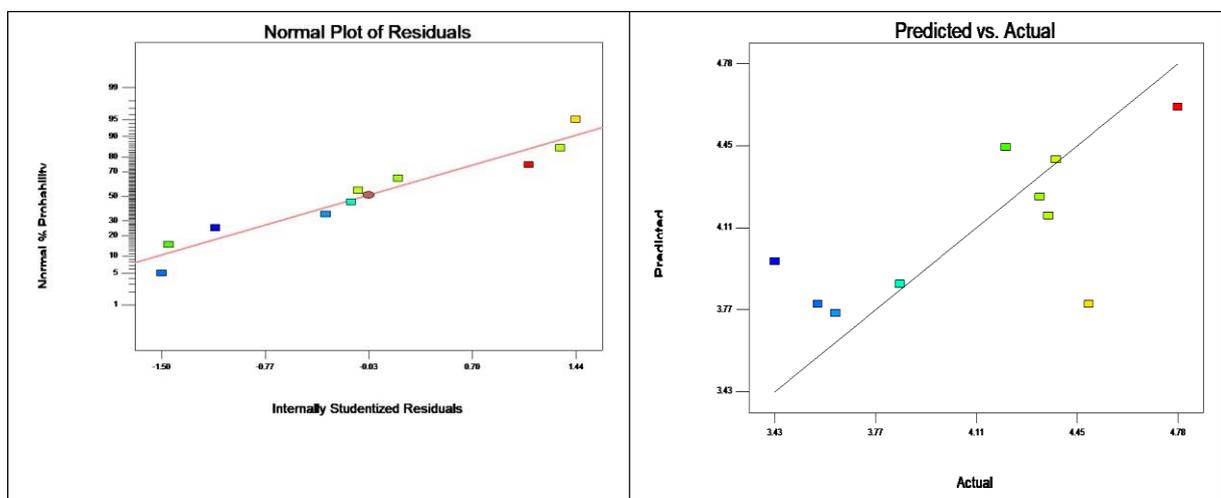


Figure III.16. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la flexion à 7 jours.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.17).

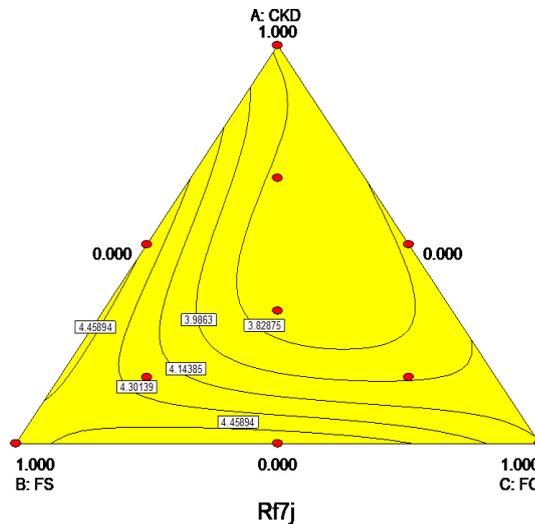


Figure III.17. Courbes iso-réponses de résistance à la flexion à 7 jours.

#### III.4.5.2. Résistance à la flexion à 14 jours

Tableau III.11. ANOVA pour la résistance à la flexion à 14 jours.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
<b>Model</b>	1.01	6	0.17	0.85	0.6054	not significant
<b>Linear Mixture</b>	0.68	2	0.34	1.72	0.3173	
<b>AB</b>	0.017	1	0.017	0.088	0.7863	
<b>AC</b>	4.261E-003	1	4.261E-003	0.022	0.8924	
<b>BC</b>	0.27	1	0.27	1.36	0.3273	
<b>ABC</b>	0.098	1	0.098	0.50	0.5321	
<b>Residual</b>	0.59	3	0.20			
<b>Cor Total</b>	1.60	9				
<b>Std. Dev.</b>			0.44	<b>R-Squared</b>		0.6299
<b>Mean</b>			4.76	<b>Adj R-Squared</b>		-0.1102
<b>C.V. %</b>			9.33	<b>Pred R-Squared</b>		-11.8135
<b>PRESS</b>			20.48	<b>Adeq Precision</b>		2.655

La "valeur F du modèle" de 0,85 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 60,54 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 2,65 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Résistance à la flexion à 14 jours) :

$$\text{Résistance à la flexion à 14 jours (MPa)} = + 4.57 * A + 5.09 * B + 4.38 * C + 0.64 * A * B - 0.32 * A * C + 2.52 * B * C - 10.03 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.18) :

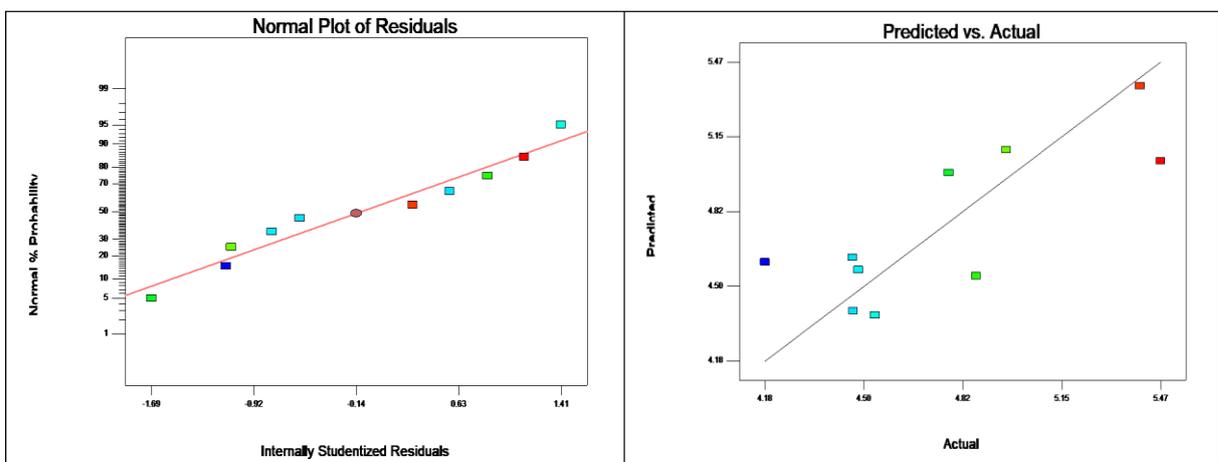


Figure III.18. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la flexion à 14 jours.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.19).

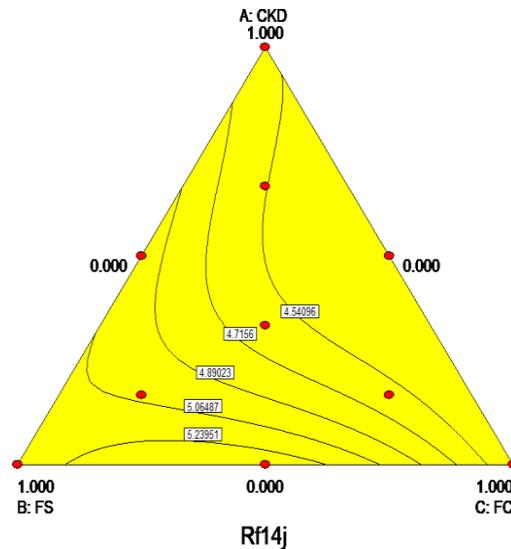


Figure III.19. Courbes iso-réponses de résistance à la flexion à 14 jours.

### III.4.5.3. Résistance à la flexion à 28 jours

Tableau III.12. ANOVA pour la résistance à la flexion à 28 jours.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	2.41	6	0.40	1.09	0.5130	not significant
Linear Mixture	1.87	2	0.93	2.54	0.2262	
AB	0.030	1	0.030	0.082	0.7931	
AC	0.21	1	0.21	0.58	0.5009	
BC	0.17	1	0.17	0.45	0.5498	
ABC	0.061	1	0.061	0.17	0.7108	
Residual	1.10	3	0.37			
Cor Total	3.51	9				
Std. Dev.					R-Squared	
Mean					Adj R-Squared	
C.V. %					Pred R-Squared	
PRESS					Adeq Precision	

La "valeur F du modèle" de 1,09 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 51,30 % de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi grande puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 2,99 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Résistance à la flexion à 28 jours) :

$$\text{Résistance à la flexion à 28 jours (MPa)} = + 5.53 * A + 6.03 * B + 4.62 * C - 0.85 * A * B - 2.25 * A * C + 1.98 * B * C + 7.94 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.20) :

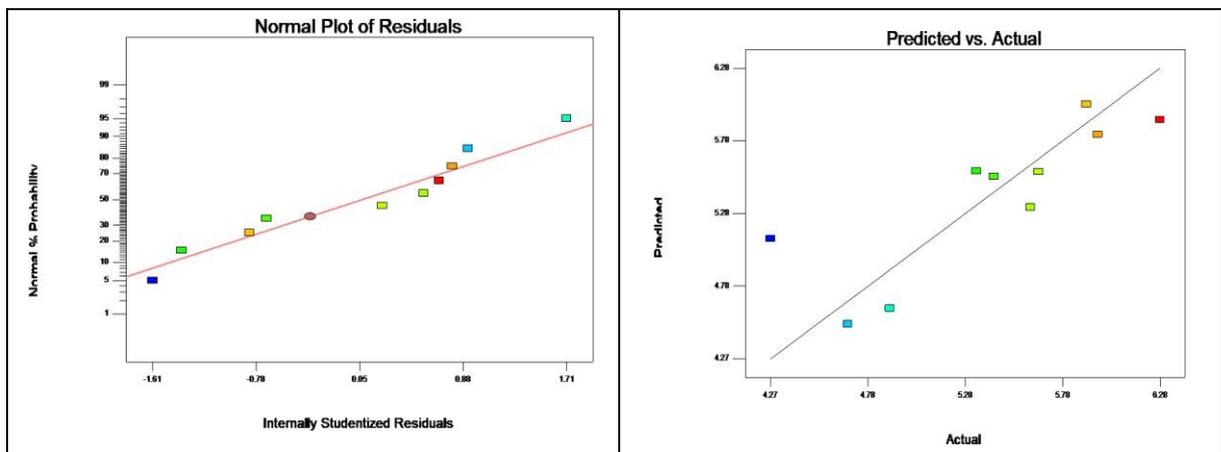


Figure III.20. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la flexion à 28 jours.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.21).

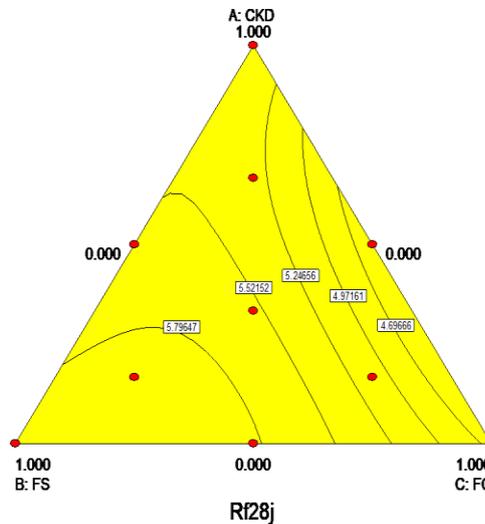


Figure III.21. Courbes iso-réponses de résistance à la flexion à 28 jours.

#### III.4.6. Absorption d'eau (%)

Tableau III.13. ANOVA pour l'absorption d'eau.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	7.98	6	1.33	0.43	0.8247	not significant
Linear Mixture	0.31	2	0.15	0.050	0.9523	
AB	0.30	1	0.30	0.096	0.7768	
AC	4.43	1	4.43	1.44	0.3169	
BC	0.92	1	0.92	0.30	0.6235	
ABC	0.16	1	0.16	0.051	0.8357	
Residual	9.25	3	3.08			
Cor Total	17.23	9				
Std. Dev.			1.76		<b>R-Squared</b>	0.4633
Mean			1.66		<b>Adj R-Squared</b>	-0.6102
C.V. %			105.71		<b>Pred R-Squared</b>	-16.7204
PRESS			305.39		<b>Adeq Precision</b>	2.103

La "valeur F du modèle" de 0,43 implique que le modèle n'est pas significatif par rapport au bruit. Il y a 82,47 % de chances qu'une « valeur F du modèle » aussi grande puisse se produire en raison du bruit. Les valeurs de "Prob > F" inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs.

Dans ce cas, il n'y a pas de termes de modèle significatifs.

Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

S'il existe de nombreux termes de modèle non significatifs (sans compter ceux requis pour prendre en charge la hiérarchie), la réduction de modèle peut améliorer votre modèle.

Un "Pred R-Squared" négatif implique que la moyenne globale est un meilleur prédicteur de votre réponse que le modèle actuel.

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport de 2,10 indique un signal inadéquat et nous ne devons pas utiliser ce modèle pour naviguer dans l'espace de conception.

Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur la réponse étudiées (Absorption d'eau) :

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = - 0.076 * A + 2.21 * B + 0.98 * C + 2.65 * A * B + 10.24 * A * C - 4.66 * B * C + 12.74 * A * B * C$$

Les valeurs de l'affaissement mesurées des différents bétons optimisés sont représentées sous forme d'une graphique qui présente les valeurs observées en fonction les valeurs prévues (figure III.22) :

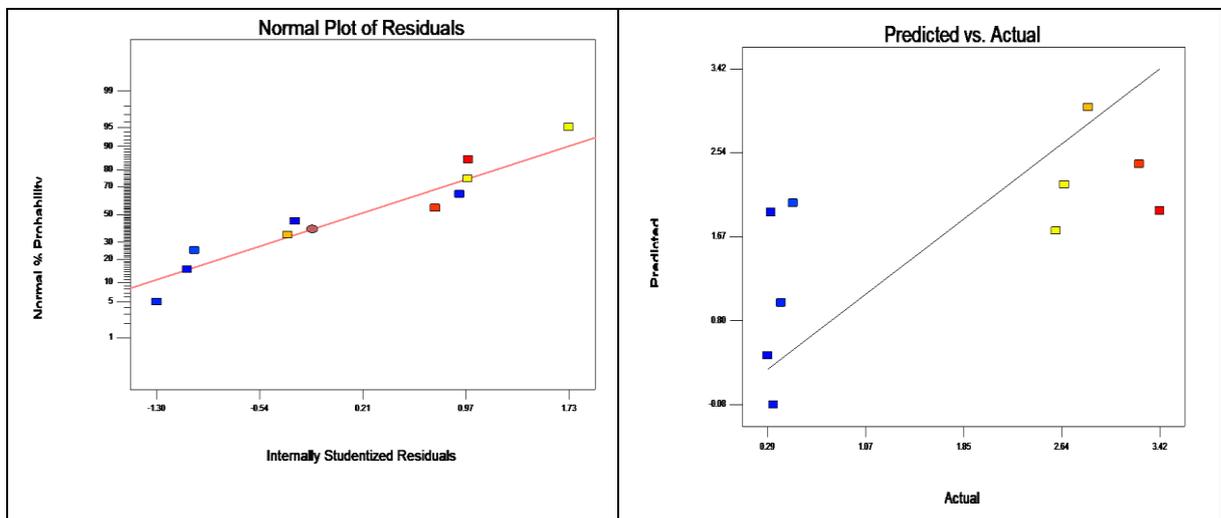


Figure III.22. Graphique de distribution de probabilité normale pour l'Absorption d'eau.

A partir des résultats obtenus des essais de compression, on a pu construire des graphiques ternaires présentant les effets des 03 constituants sur la réponse étudiée (figure III.23).

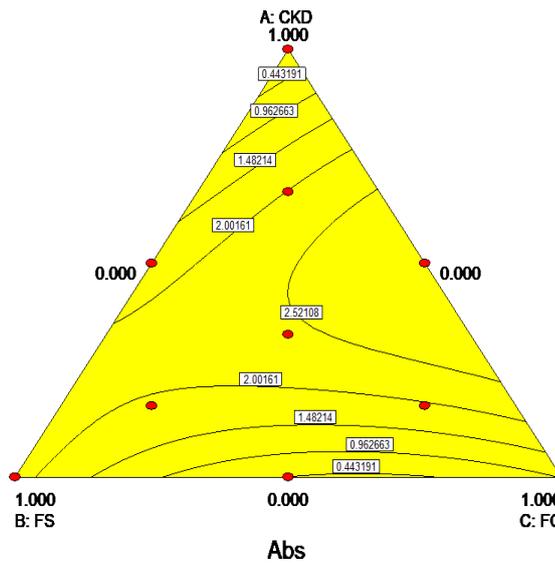


Figure III.23. Courbes iso-réponses de l’Absorption d’eau.

### III.5. Conclusion

Le présent chapitre avait pour objet l’étude de l’effet de la substitution du ciment par des fines (la poussière de fours (CKD)), Fumée de silice (FS) et les fines calcaires (FC)) sur les propriétés des BAP à l’état frais et durcis en utilisant l’approche des plans d’expérience.

Les résultats obtenus montrent que l’introduction de calcaire (FC) et de fumée de silice (FS), Ainsi que la poussière de fours (CKD) dans le ciment (en substitution) conduit à une amélioration considérable des propriétés à l’état frais et durcis.

---

# Conclusion générale

---

### **Conclusion générale**

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse nous ont conduits à tirer plusieurs conclusions et remarques importantes.

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par leur fluidité élevée de sorte qu'ils puissent être mis en application sans vibration. Les effets des fillers sur leur comportement à l'état frais et à l'état durcis sont d'une grande importance pour un plus large usage de ces matériaux.

Les travaux réalisés ont également conduit à optimiser la formulation des BAP à base de matériaux locaux de l'Algérie. En utilisant une nouvelle méthode appelée "plans d'expériences". Les résultats des essais de formulation et de modélisation du composite étudié montrent en générale, que la théorie des plans d'expériences permet une modélisation empirique d'effets des paramètres étudiés (La poussières de fours (CKD), Fumée de silice (FS) et de filler calcaire (FC)) et d'évaluer la qualité de la modélisation. Les modèles mathématiques issus de l'application de cette approche statistique ont facilité la visualisation de l'effet de chacun des facteurs étudiés sur les propriétés des BAP.

Les résultats trouvés ont montré que, globalement, l'introduction de la poussière de fours (CKD) et de l'addition la fumée de silice (FS), ainsi que l'addition de calcaire (FC) de la poussière de fours (CKD) dans le ciment (en substitution) joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen. Il apparait notamment que la résistance mécanique augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (6 % de CKD et 6% de FS), et (6 % de FS et 6 % de FC) puis la résistance mécanique est bien pour les autres pourcentages.

---

# Références Bibliographiques

---

---

## Référence bibliographique

---

- [1]. Assié. S., 2004 – Durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Toulouse. France. 249p.
- [2] K. Ozawa, K. Maekawa, M. Kunishima, H. Okamura, Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, in: Proceedings of the Second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, 1989: pp. 445–450.
- [3] K.H.C. Khayat, H. Monty, Stability of Self-Consolidating Concrete, Advantages, and Potential Applications, in : 1st International RILEM Symposium on Self – Compacting Concrete, RILEM Publications SARL, 1999 : pp. 143–152.
- [4] M. Ouchi, Y. Edamatsu, A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete, in: First Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr., RILEM Publications SARL, 1999: pp. 121–130.
- [5] P. Nanthagopalan, M. Santhanam, Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of Self-Compacting Concrete, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 3443–3449. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.029.
- [6] H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-compacting concrete, Struct. Concr. 1 (2000) 3–17. doi:10.1680/stco.2000.1.1.3.
- [7] H. Okamura, M. Ouchi, Self Compacting Concrete – Development, Present Use and Future, in: 1st International RILEM Symposium on Self - Compacting Concrete, RILEM Publications SARL, 1999: pp. 3–14.
- [8] M. Ouchi, Self-Compacting Concrete-Development, Applications and Investigations, Nord. Concr. Res. Publ. 23 (2000) 29–34.
- [9] P. Desnerck, B. Craeye, V. Boel, P. Van Itterbeeck, Mixture compositions and fresh properties of self- compacting concrete : analysis of 25 years of research, in : SCC 2016, 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Flowing toward Sustainability, 2016 : pp. 1–10.
- [10] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 44 (2002) 1–32. Doi : 0 9539733 4 4.
- [11] S. Assié, Durabilité des bétons autoplaçants, thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2004.
- [12] K.. Khayat, Workability , Testing , and Performance of Self-Consolidating, ACI Mater. J. (1999).

- [13] S. Utsi, Performance based concrete mix-design, Lulea University of Technology, Lulea Sweden, 2008.
- [14] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Adv. Concr. Technol.* 1 (2003) 5–15. doi:10.1016/B978-075065686-3/50295-0.
- [15] N.G. S.G. Ladkany, V.K. Doli, T.K. McEwan, High strength self-consolidating concrete for practical applications, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium. (2007) 1065–1070.
- [16] P. Turcry, Retrait et fissuration des bétons autoplaçants Influence de la formulation, Université de Nantes, 2004.
- [17] F. Dehn, K. Holschemacher, D. Weisse, Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour, LACER (Leipzig Annu. Civ. Eng. Report). (2000)115–124.
- [18] B. Abdi, La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures, université Sherbrooke, 2005.
- [19] S. Nan, M. Buquan, A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 215–222.
- [20] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study, *Cem. Concr. Res.* 29 (2007) 1–12. doi:10.1016/j.cemconres.2005.06.002.
- [21] H. Okamura, K. Ozawa, Mix design for self-compacting concrete, *Concr. Libr. Japanese Soc. Civ. Eng.* 25 (1995) 107–120.
- [22] M. Ouchi, M. Hibino, H. Okamura, Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1574 (1997) 37–40. doi:10.3141/1574-05.
- [23] B. Nécira, Développement des bétons autoplaçants à hautes performances: influence de la composition, Thèse de Doctorat université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [24] F. De Larrard, T. Sedran, D. Angot, Prédiction de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide - i - fondements théoriques et étalonnage du modèle, *Bull. Liaison Des Lab. Des Ponts Chaussées.* 194 (1994) 59–70.
- [25] O. Petersson, P. Billberg, B. Van, A model for self-compacting concrete. 1996., in: *Proceedings of International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete.* RILEM, 1999.
- [26] S. Tangtermsirikul, V. Bui, Blocking Criteria for Aggregate Phase of Self-Compacting High-Performance Concrete, in: *Proceedings of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand, 1995:* pp. 58–69.

- [27] S.G. Oh, T. Noguchi, F. Tomosawa, Toward mix design for rheology of self-compacting concrete, in : Å. Skarendahl and Ö. Petersson (Ed.), *First Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr.*, RILEM Publications SARL, 1999 : pp. 361–372.
- [28] R.K. Dhir, P.C. Hewlett, J.. Lota, T.D. Dyer, An investigation into the feasibility of formulating -self-curel concrete, *Mater. Struct.* 27 (1994) 606–615.
- [29] C. Ozyildirim, S. Lane, Final report : Evaluation of self-compacting concret, 2003.
- [30] P. Aggarwal, Y. Aggarwal, S.M. Gupta, R. Siddique, Properties of Self-Compacting Concrete – an Overview, in: *30th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES*, Singapore, LTD, CI-Premier PTE, 2005: pp. 485–494.
- [31] M. Abdul Hameed, A study of mix design and durability of s self compacting concrete, Master of Science, King Fahd University of Petroleum and Minerals , Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, 2005. <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0188126>.
- [32] A.M. Neville, J.J. Brooks, *Concrete Technology*, Second Edi, Pearson Education Limited, 2010.
- [33] W. Zhu, P.J. Bartos, Microstructure and Properties of Interfacial Transition Zone in SCC, in : *1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, RILEM Publications SARL, 2005 : pp. 319–327. Doi :10.1617/2912143624.033.
- [34] C. Selvamony, M.S. Ravikumar, S.U. Kannan, S. Gnanappa Basil, Investigations on Self-Compacted Self-Curing Concrete Using Limestone Powder and Clinkers, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 5 (2010) 1–6.
- [35] M. Şahmaran, H.A. Christianto, I.O. Yaman, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 432–440. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003.
- [36] A. Rmili, Mongi, B. Ouezdou, M. Added, E. Ghorbel, Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self Compacting Concretes Part I : Study of Formulation, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 3 (2009) 3–9.
- [37] D. Lowke, C. Gehlen, The zeta potential of cement and additions in cementitious suspensions with high solid fraction, *Cem. Concr. Res.* 95 (2017) 195–204. Doi :10.1016/j.cemconres.2017.02.016.
- [38] B. Jönsson, H. Wennerström, A. Nonat, B. Cabane, Onset of cohesion in cement paste, *Langmuir.* 20 (2004) 6702–6709. Doi :10.1021/la0498760.
- [39] G. Dreux, J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, 8eme édit, Eyrolles, 1998.
- [40] J. Hot, *Influence des polymères de type superplastifiants et agents entraîneurs d’air sur la viscosité des matériaux cimentaires*, Université Paris-Est, 2013.
- [41] M.S. Shetty, *Concrete technology- theory and practice*, Multicolou, S. Chand & Company Ltd, 2009.

- [42] B. Felekoğlu, H. Sarikahya, Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1972–1980. Doi : 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.005.
- [43] M. Benaicha, A.H. Alaoui, O. Jalbaud, Y. Burtschell, Dosage effect of superplasticizer on self-compacting concrete : Correlation between rheology and strength, *J. Mater. Res. Technol.* (2019) 1–7. Doi : 10.1016/j.jmrt.2019.01.015.
- [44] M. Sonebi, Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1199–1208. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.022.
- [45] M. Nehdi, M. Pardhan, S. Koshowski, Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 2103–2112. Doi : 10.1016/j.cemconres.2004.03.018.
- [46] A. Kanellopoulos, M.F. Petrou, I. Ioannou, Durability performance of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 320–325. Doi : 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.049.
- [47] AFNOR, Eau de gâchage pour bétons: Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, (2003).
- [48] The European Project Group, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete : Specification, Production and Use, *The European Guidelines for Self Compacting Concrete.* (2005) 63. Doi : 0 9539733 4 4.
- [49] O.R. Khaleel, S.A. Al-Mishhadani, H. Abdul Razak, The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of Self-Compacting Concrete (SCC), *Procedia Eng.* 14 (2011) 805–813. Doi : 10.1016/j.proeng.2011.07.102.
- [50] J. Hu, I.L. Souza, F.C. Genarini, Engineering and environmental performance of with low powder content and recycled concrete aggregate, *J. Sustain. Cem. Mater.* ISSN. 0373 (2016) 2–16. doi:10.1080/21650373.2016.1230901.
- [51] J.J. Assaad, Influence of recycled aggregates on dynamic/static stability of self-consolidating concrete, *J. Sustain. Cem. Mater.* 6 (2017) 345–365. doi:10.1080/21650373.2017.1280427.
- [52] Y. Xie, B. Liu, J. Yin, S. Zhou, Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 477–480. Doi : 10.1016/S0008-8846(01)00708-6.
- [53] Ö. Petersson, Self-compacting concrete : Preliminary Mix Design- FINAL REPORT OF TASK 1, 1997.
- [54] S. V Rao, M.V. Rao, P.R. Kumar, Effect of Size of Aggregate and Fines on Standard And High Strength Self Compacting Concrete, *J. Appl. Sci. Res.* 6 (2010) 433–442. doi:10.21275/ART20161444

- [55] Vishnukanth, R. Tilaganji, Experimental Investigation on Self Compacting Concrete by Introducing Fly Ash with Varied Size of Aggregate, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 4 (2017) 2579–2586. <https://irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7526.pdf>.
- [56] M. Geiker, M. Brandl, L. Thrane, L. Nielsen, On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete, *Cem. Concr. Aggregates*. 24 (2002) 3–6. doi: <https://doi.org/10.1520/CCA10484J>.
- [57] B. Nécira, Étude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants, Mémoire Magister, Université Mohamed Khider- Biskra, 2006.
- [58] M.R. Taylor, F.D. Lydon, B.I.G. Barr, Mix proportions for high strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 10 (1996) 445–450. Doi :[10.1016/0950-0618\(96\)00012-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00012-8).
- [59] D. Bonen, S.P. Shah, Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete, *Prog. Struct. Eng. Mater.* 7 (2005) 14–26. Doi :[10.1002/pse.186](https://doi.org/10.1002/pse.186)
- [60] A. Krishna, A. V. , Krishna Rao, B., Rajagopal, Effect of different sizes of coarse aggregate on the properties of NCC and SCC, *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2 (2010) 5959–5965.
- [61] C. Tasi, L. Li, C. Hwang, The Effect of Aggregate Gradation on Engineering Properties of High Performance Concrete, *J. ASTM Int.* 3 (2006) 1–12. Doi :<https://doi.org/10.1520/JAI13410>.
- [62] H.A. Al-Sanad, N.F. Ismael, A.J. Nayfeh, Geotechnical properties of dune sands in Kuwait, *Eng. Geol.* 34 (1993) 45–52. Doi :[10.1016/0013-7952\(93\)90042-B](https://doi.org/10.1016/0013-7952(93)90042-B).
- [63] A. Ghrieb, R. Mitiche-Kettab, A. Bali, Stabilization and utilization of dune sand in road engineering, *Arab. J. Sci. Eng.* 39 (2014) 1517–1529. Doi :[10.1007/s13369-013-0721-z](https://doi.org/10.1007/s13369-013-0721-z).
- [64] M.I. El-Sayed, Sedimentological characteristics and morphology of the aeolian sand dunes in the eastern part of the UAE : A case study from Ar Rub' Al Khali, *Sediment. Geol.* 123 (1999) 219–238. Doi :[10.1016/S0037-0738\(98\)00116-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00116-X).
- [65] M.G.M. Elipe, S. López-Querol, Aeolian sands : Characterization, options of improvement and possible employment in construction – The State-of-the-art, *Constr. Build. Mater.* (2014) 728–739. Doi :[10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008).
- [66] E. Lee, S. Park, Y. Kim, Drying shrinkage cracking of concrete using dune sand and crushed sand, *Constr. Build. Mater.* (2016). Doi : [10.1016/j.conbuildmat.2016.08.141](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.141).
- [67] A.S. Al-Harthy, M.A. Halim, R. Taha, K.S. Al-Jabri, The properties of concrete made with fine dune sand, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1803–1808. Doi : [10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053).
- [68] F.J. Luo, L. He, Z. Pan, W.H. Duan, X.L. Zhao, F. Collins, Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 131–137. Doi : [10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005).
- [69] B. Belhadj, M. Bederina, N. Montrelay, J. Houessou, M. Quéneudec, Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete, *Constr. Build. Mater.* 66 (2014) 247–258. Doi :[10.1016/j.conbuildmat.2014.05.090](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.090).

- [70] B. Jin, J. Song, H. Liu, Engineering characteristics of concrete made of desert sand from Maowusu sandy land, *Appl. Mech. Mater.* Vols. 174–177 (2012) 604–607. Doi :10.4028/www.scientific.net/AMM.174-177.604.
- [71] B. Kilanowski, Self Compacting Concret : Actual status (and future development) in Europe, (n.d.) 1–50. <https://anfah.org/wp-content/uploads/pdf/6-scc-presentation-for-anfah.pdf>.
- [72] K. Holschmacher, Y. Klug, A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC, *Lacer.* 7 (2002) 123–134.
- [73] J.C. Gibbs, W. Zhu, Strength of hardened self-compacting concrete, in : First Int. RILEM Symp. Self-Compacting Concr., RILEM Publications SARL, 1999 : pp. 199–209.
- [74] F. Gussigh, Bétons auto-plaçants (BAP), *Tech. L'ingénieur.* (2014) 12.
- [75] Y.P. Kapoor, Self Compacting Concrete An Economical Approach, *Masterbuilder.* (2012) 92–96. <https://www.masterbuilder.co.in/data/edata/Articles/July2012/92.pdf>.
- [76] F. De Larrard, Concrete Mixture Proportioning, A Scientific Approach, MODERN CON, 1999.
- [77] J. Péra, S. Husson, B. Guilhot, Influence of finely ground limestone on cement hydration, *Cem. Concr. Compos.* 21 (1999) 99–105.
- [78] P.L. Domone, A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 1–12. Doi : 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.010.
- [79] W. Zhu, J.C. Gibbs, P.J.M. Bartos, Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements, *Cem. Concr. Compos.* 23 (2001) 57–64. Doi :10.1016/S0958-9465(00)00053-6.
- [80] P. Dinakar, K. Babu, M. Santhanam, Mechanical Properties of High Volume Fly Ash Self, in : 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium, 2007 : pp. 651–657.
- [81] C. Druta, Tensile Strength and Bonding Characteristics of Self-Compacting Concrete, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Master's Theses, 2003.
- [82] **Felekoglu, B. A.** Comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials.* vol. 22, no 4, p. 646-654. (2008)
- [83] **Persson, B.** A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and concrete Research* 31.2: 193-198. (2001).
- [84] AFGC : Association française de Génie Civil, Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64p. (2008).

- [85] Pons, G., Proust, E., et Assié, S. Creep and shrinkage of self-compacting concrete : a different behaviour compared with vibrated concrete. Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Vol.17. (2003).
- [86] Rozière, E., Turcry, P., et Loukili, A. Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait et la fissuration des bétons autoplçants. In XXIIIème rencontres universitaires de Génie Civil. Grenoble. (2005).
- [87] Pineaud, A. Contribution a l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplçants et application à l'industrie de la préfabrication. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, p. 271. (2007).
- [88] Hanaa FARES "Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplçant exposés à une température élevée ",Thèse de doctorat ,Université de Cergy-Pontoise,2009
- [89] **Goupy J, 2006** : « Les plans d'expériences », Revue MODULAD, 2006.
- [90] **Goupy J, 2000** : « Plans d'expériences : les mélanges », Dunod, Paris, 285 pages, ISBN 2 10 004218 1.