



الجمهورية الجزائرية

قراطية الشعبية

Republique Algérienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث

العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

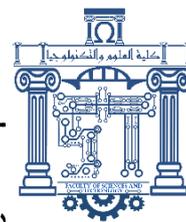
جامعة العربي

تبيسة - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

**En : Génie Civil**

**Spécialité : Structure**

**Par : BOUACHMA Haroune Saif Eddine**

**Sujet**

**Etude de l'influence des paramètres de formulation  
sur les propriétés d'un béton autoplaçant à base de  
déchets**

Présenté et soutenu publiquement, le 25/06/2024, devant le jury composé de :

Dr. HMIDAN Hemida  
BOULAARES Said  
Dr. AYEB Belkhir

MCB  
MCB  
MAA

Président  
Rapporteur  
Examineur 1

...

...

...

Promotion : 2023/2024

# ملخص

## دراسة تأثير وتوصيف خرسانة ذاتية التدفق بناءً على نفايات الزجاج

بوشمة هارون سيف الدين

تركز الدراسة على استخدام الزجاج المعاد تدويره في إنتاج الخرسانة بطريقة مبتكرة. تُعرف هذه المادة باسم خرسانة ذاتية التدفق، وهي مصممة للتدفق بشكل ذاتي في القوالب بدون الحاجة إلى اهتزاز، مما يعزز كفاءة البناء ويقلل من تكاليف العمالة.

يتم دمج نفايات الزجاج، التي غالبًا ما تكون ناتجة عن عمليات التدوير، في خليط الخرسانة لتحل محل جزء من الأسمنت أو المواد الكاشطة التقليدية. يهدف هذا الاستبدال إلى تقليل البصمة الكربونية للخرسانة وفي نفس الوقت الاستفادة من النفايات. تركز الدراسة على عدة جوانب رئيسية: تركيب الخليط، والخصائص الميكانيكية مثل قوة الضغط.

يتم تقييم خصائص خرسانة ذاتية التدفق بناءً على نفايات الزجاج من خلال اختبارات معملية دقيقة، بما في ذلك تحليل حبيبات الزجاج، وخصائص التدفق للخليط. عادةً ما تظهر النتائج تحسناً في قوة الضغط مقارنةً بالخرسانات التقليدية،

تسعى هذه الدراسة إلى تعزيز اعتماد خرسانة ذاتية التدفق بناءً على نفايات الزجاج في صناعة البناء كحلًا مستدامًا لمواجهة التحديات المعاصرة في إدارة النفايات وتقليل البصمة الكربونية.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة ذاتية التدفق، النفايات الزجاجية، الخواص الميكانيكية، الريولوجيا،

المقاومة.

# Résumé

## Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant à base de déchets

**BOUACHMA Haroune Saif Eddine**

L'étude de l'influence et la caractérisation d'un béton autoplaçant à base de déchets de verre se concentre sur l'utilisation innovante des déchets de verre dans la production de béton. Ce matériau, appelé béton autoplaçant, est conçu pour se couler de manière autonome dans les moules sans besoin de vibration, ce qui améliore l'efficacité de la construction et réduit les coûts de main-d'œuvre.

Cette substitution vise à réduire l'empreinte carbone du béton tout en valorisant les déchets. L'étude se penche sur plusieurs aspects clés : la formulation du mélange, les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et la durabilité, ainsi que l'impact environnemental global du matériau.

Les caractéristiques du béton autoplaçant à base de déchets de verre sont évaluées à travers des tests de laboratoire rigoureux, incluant la granulométrie du verre, et la rhéologie du mélange. Les résultats montrent généralement une amélioration de la résistance à la compression par rapport aux bétons traditionnels.

Cette étude cherche à promouvoir l'adoption de bétons autoplaçants à base de déchets de verre dans l'industrie de la construction comme une solution durable pour répondre aux défis contemporains de la gestion des déchets et de la réduction de l'empreinte carbone.

**Les mots clés :** béton autoplaçant, déchets de verre, propriétés mécaniques, rhéologie, résistance.

# Abstract

## **Study of the influence of formulation parameters on the properties of self-compacting concrete based on waste**

**BOUACHMA Haroune Saif Eddine**

The study on the influence and characterization of self-compacting concrete based on glass waste focuses on the innovative use of glass waste in concrete production. This material, known as self-compacting concrete, is designed to flow autonomously into molds without the need for vibration, thereby enhancing construction efficiency and reducing labor costs.

Glass waste, often sourced from recycling, is incorporated into the concrete mix to partially replace cement or traditional aggregates. This substitution aims to reduce the carbon footprint of concrete while also valorizing waste. The study examines several key aspects: mix formulation, mechanical properties such as compressive strength and durability, as well as the overall environmental impact of the material.

The characteristics of self-compacting concrete using glass waste are evaluated through rigorous laboratory tests, including glass particle size analysis and mix rheology. Results generally show improved compressive strength compared to traditional concretes.

This study aims to promote the adoption of self-compacting concretes based on glass waste in the construction industry as a sustainable solution to contemporary challenges in waste management and carbon footprint reduction.

**Key words:** self-compacting concrete, glass waste, mechanical properties, rheology, resistance.

# Dédicace

*« À mes chers parents, vos encouragements sont la seule*

*Chose qui me fait avancer.*

*À ma sœur et à mon frère*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*À tous mes amis, ceux qui sont près de mon cœur mais loin de ma langue.*

*À tous ceux qui ont eu un impact sur ma carrière.*

*Merci, je vous dédie ce travail »*

# Remerciement

Au nom d'Allah, notre Seigneur et Créateur, qui nous a gratifiés du don de raisonnement et de la quête du savoir, nous commençons par exprimer notre gratitude.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, le Dr BOULAARES Said pour leur confiance et leur patience indéfectibles. Leur conseil éclairé, et leur engagement ont contribué à l'élaboration de cette thèse.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude aux membres estimés du jury Dr. AYEB Belkhir et Dr. HMIDAN Hemida pour avoir accepté d'évaluer et de juger cet humble travail.

Enfin, je dois exprimer ma profonde gratitude à ma famille. Leur soutien indéfectible, leurs encouragements continus et leurs innombrables sacrifices tout au long de notre parcours académique ont rendu cette réalisation possible.

# Sommaire

ملخص	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Dédicace	iv
Remerciement	v
Sommaire	vi
Liste Des Figures	ix
Liste des Tableaux	xi
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Étude Bibliographique	3
Introduction :	4
1. Historique de béton autoplaçant :	4
2. Définition d'un béton autoplaçant :	5
3. Domaine d'application du béton autoplaçant :	6
4. Mise en œuvre et précaution d'emploi de BAP :	7
5. Cahier des charges d'un béton autoplaçant :	8
6. Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant :	8
6.1. Un volume de pâte important	8
6.2. Une quantité de fines (<80um) importante	9
6.3. L'utilisation des superplastifiants	9
6.4. Utilisation éventuelle d'un réteneur d'eau (dit agent de viscosité)	10
6.5. Un faible volume de gravillon	10
7. Caractérisation d'un béton auto plaçant :	11
7.1. Propriétés des BAP à l'état frais	11
7.1.1. Le remplissage	11
7.1.2. La résistance à la ségrégation	11
7.1.3. La capacité de passage	11
7.2. Propriétés des BAP à l'état durci	13
8. Constituants de béton autoplaçant :	14
8.1. Les granulats	15
8.2. Le ciment	15
8.3. Les ajouts minéraux	15
9. Différents types des méthodes de formulations du BAP :	16

9.1.	Méthode de formulation pratique des BAP _____	16
9.2.	Formulations des BAP existants dans la bibliographie _____	17
9.2.1.	Approche japonaise _____	17
9.2.2.	Approche CBI (suédoise) _____	17
9.2.3.	Approche LCPC _____	18
9.2.4.	Approche AFGC : _____	19
10.	Essai de caractérisations de BAP : _____	20
10.1.	Essais de fluidité : _____	20
10.2.	Ségrégation dynamique _____	21
10.3.	Ressuage _____	22
11.	Fabrication, transport et mise en place des BAP _____	23
11.1.	Fabrication des BAP _____	23
11.2.	Transport des BAP _____	23
11.3.	Mise en place _____	23
	Conclusion _____	24
	Chapitre 2 : Étude Expérimentale _____	26
	Introduction _____	27
1.	Matériaux Utilise _____	27
1.1.	Ciment _____	27
1.2.	Granulas _____	27
1.3.	Eau de gâchage _____	28
1.4.	Adjuvant (superplastifiant) _____	28
1.5.	Ajouts minéraux _____	28
2.	Essai sur granulas _____	31
2.1.	Échantillonnage des matériaux _____	31
2.2.	Analyse granulométrique : _____	31
2.3.	Masses volumiques absolue : _____	34
3.	Formulation de BAP _____	35
	Conclusion _____	37
	Chapitre 3 : Résultats Expérimentaux et Interprétation _____	38
	Introduction _____	39
1.	La granulométrie des gravillons _____	39
2.	Malaxage des bétons _____	41
3.	Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais _____	42
3.1.	Essai d'étalement au cône d'Abrams _____	42
3.2.	Essai de stabilité au tamis _____	44

3.3. Essai de la boîte en « L »	45
3.4. Confection des éprouvettes	47
4. Présentation de résultats	48
4.1. Etat frais	48
4.2. État durci	54
Conclusion	57
Conclusion Générale	58
Référence Bibliographique	60
Annexe A	64
Annexe B	66

# Liste Des Figures

Figure 1.1 : Le pont Akashi Kaikyo.....	6
Figure 1.2 : La tour Landmark Tower .....	7
Figure 1.3 : Dispersion les granulats par excès de pate .....	9
Figure 1.4 : Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment .....	10
Figure 1.5 : Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment .....	12
Figure 1.6 : Différence entre un béton conventionnel et un béton autoplaçant .....	16
Figure 1.7 : Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams) .....	20
Figure 1.8 : Essai de la boîte en L .....	21
Figure 1.9 : Essai de la stabilité au tamis.....	22
Figure 2.1 : le ciment utilise dans l'étude .....	27
Figure 2.2 : Le superplastifiant SIKAPLAST 40 PRO .....	28
Figure 2.3 : La poudre de verre<0.008 mm.....	29
Figure 2.4 : Le verre en cas granulaire .....	30
Figure 2.5 : Machine los Angeles ( operation de concassage du verre) .....	30
Figure 2.6 : Essai de tamisage des granulats.....	31
Figure 2.7 : Courbes granulométriques de gravier 3/8.....	32
Figure 2.8 : Courbes granulométriques de gravier 8/15.....	33
Figure 2.9 : Courbes granulométriques de sable 0/3.....	34
Figure 2.10 : Éprouvette gradue .....	35
Figure 3.1 : le bétonnière .....	41
Figure 3.2 : Essai d'étalement au cône d'Abrams .....	43
Figure 3.3 : Essai de stabilité au tamis .....	44
Figure 3.4 : Essai de boîte L.....	46
Figure 3.5 : Les moules utilisent dans l'étude.....	47
Figure 3.6 : Les éprouvettes conservées sous l'eau .....	48
Figure 3.7 : Boîte L en fonction de deux pourcentages superplastifiants .....	49
Figure 3.8 : Etalement en fonction de deux pourcentages superplastifiants .....	49
Figure 3.9 : Stabilité en fonction de deux pourcentages superplastifiants .....	49
Figure 3.10 : Boîte L en fonction de 5% poudre de verre .....	50
Figure 3.11 : Etalement en fonction de 5% poudre de verre.....	50
Figure 3.12 : Stabilité en fonction de deux pourcentage superplastifiant et 5% poudre de verre .....	50
Figure 3.13 : Boîte L en fonction de 15% poudre de verre .....	51
Figure 3.14 : Etalement en fonction de 15% poudre de verre.....	51
Figure 3.15 : Stabilité en fonction de 15% poudre de verre .....	51
Figure 3.16 : Boîte L en fonction de 5% verre granulaire.....	52
Figure 3.17 : Etalement en fonction de 5% verre granulaire .....	52
Figure 3.18 : Stabilité en fonction de 5% verre granulaire .....	52
Figure 3.19 : Boîte L en fonction de 15% verre granulaire.....	53
Figure 3.20 : Etalement en fonction de 15% verre granulaire .....	53
Figure 3.21 : Stabilité en fonction de 15% verre granulaire .....	53

Figure 3.22 : Essai d'écrasement machine manuelle .....	55
Figure 3.23 : Les Résultats d'essai de compression .....	56

# Liste des Tableaux

Tableau 1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP. _____	12
Tableau 2 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 _____	32
Tableau 3 : Analyse granulométrique du gravier 8/15 _____	32
Tableau 4 : Analyse granulométrique du sable 0/3 _____	34
Tableau 5 : la masse volumique absolue _____	35
Tableau 6 : Les différents mélanges utilisent _____	40
Tableau 7 : les mélanges pour 1m <sup>3</sup> _____	40
Tableau 8 : Les résultats d'essai d'étalement _____	43
Tableau 9 : Les résultats d'essai de stabilité _____	45
Tableau 10 : Les résultats d'essai boîte en L _____	47
Tableau 11 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec deux pourcentages de superplastifiant _____	49
Tableau 12 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec deux pourcentages de superplastifiant et 5% poudre de verre _____	50
Tableau 13 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 15% poudre de verre _____	51
Tableau 14 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 5% verre granulaire _____	52
Tableau 15 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 15% verre granulaire _____	53
Tableau 16 : Les Résultats d'essai de compression _____	55

# Introduction Générale

De nos jours, le béton doit répondre à des normes de plus en plus strictes en termes de performances mécaniques, de durabilité, de facilité de mise en œuvre, de respect de l'environnement et d'aspect esthétique. Pour atteindre ces objectifs, la recherche continue a conduit à développer différents types de bétons spécialisés : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

Le béton autoplaçant (BAP), connu sous le nom de self compacting concrete (SCC) en anglais, représente une véritable innovation dans le domaine du béton. Il se caractérise par sa fluidité, sa capacité à se déformer et sa facilité de mise en place sans nécessiter de vibration. Il peut épouser parfaitement les contours des coffrages les plus complexes, permettant ainsi la réalisation d'ouvrages aux formes variées ou à forte densité d'armatures, tout en offrant généralement des surfaces de meilleure qualité.

Un béton est considéré comme autoplaçant lorsqu'il satisfait à des critères spécifiques tant à l'état frais qu'à l'état durci. Pour cela, sa composition doit inclure au minimum un adjuvant chimique et un ajout minéral, garantissant ainsi ses propriétés de maniabilité et de stabilité.

Les bétons autoplaçants présentent de nombreux avantages, notamment :

## **Avantages techniques :**

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton ;
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés ;
- Réalisation d'éléments de forme complexe.

## **Avantages économiques :**

- Réduction du coût de la main d'œuvre et du temps de bétonnage ;
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier

## **Avantages écologiques :**

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).

- Diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP).

Cependant, il est à signaler une augmentation du coût des matières premières suite à l'incorporation d'adjuvants et différentes additions minérales. Le sujet de ce travail s'articule autour de la formulation et des propriétés de bétons autoplçants élaborés à partir de déchets de verre et de comparer les performances, en termes de résistance mécanique, par rapport à un béton ordinaire. L'étude consiste en l'investigation de l'influence d'ajouts de verre ; à savoir ; la poudre de verre, verre en granulats, sur le comportement à l'état frais, à l'état durci et à la rupture des différents BAP.

Ce mémoire s'organise en deux grandes parties :

- **Une partie théorique** ; qui est une synthèse bibliographique qui comporte un rappel des définitions fondamentales sur les bétons autoplçants (BAP). Les méthodes de formulation d'un BAP, les essais de caractérisation à l'état frais et à l'état durci, ainsi que le processus d'élaboration et de transport y sont également développés.
- **Une partie expérimentale** ; consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons mis en œuvre dans le cadre de cette étude. La méthode de formulation ainsi que les compositions retenues pour le béton autoplçants y est mentionnée. Puis, sont détaillés les essais sur bétons à l'état frais et à l'état durci. Enfin, Analyser et optimiser les paramètres de formulation pour améliorer les propriétés mécaniques d'un béton autoplçant à base de déchet de verre, en mettant l'accent sur la résistance à la compression.

Bien entendu tous les résultats des essais effectués au laboratoire sont présentés et suivis d'une interprétation et d'une conclusion générale.

# **Chapitre 1 : Étude Bibliographique**

**Introduction :**

Les maîtres d'œuvres, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton ont toujours recherché un béton permettant :

- Une mise en place aisée,
- Un bon remplissage des coffrages
- Un parfait enrobage des armatures.

La vibration a toujours été utilisée pour obtenir ces caractéristiques essentielles du béton. Cependant, face à la complexité croissante des structures, à la diversité des formes et aux concentrations élevées d'armatures, les formulations de béton ont dû évoluer. Elles ont progressivement permis d'atteindre une fluidité accrue, malgré une réduction de la quantité d'eau de gâchage, rendant la vibration de moins en moins nécessaire. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible grâce à l'introduction sur le marché des dernières générations d'adjuvants superplastifiants.

L'émergence du béton autoplaçant remonte aux années 80, initiée par le Japon, qui a développé cette nouvelle technique. Depuis lors, cette innovation s'est répandue progressivement à travers le monde, sous diverses appellations telles que béton auto-compactant (BAC), self-compacting concrete (SCC en anglais) ou béton hyperfluide. Toutefois, aujourd'hui, c'est l'appellation béton autoplaçant (BAP) qui est la plus couramment utilisée.

**1. Historique de béton autoplaçant :**

Les bétons autoplaçants sont des matériaux spéciaux à haute performance, principalement caractérisés par leur fluidité lorsqu'ils sont frais et leur uniformité une fois durcis. Ils peuvent se mettre en place naturellement sous l'effet de la gravité, sans nécessiter de vibration même dans des coffrages très complexes avec une densité élevée d'armatures. L'idée de ces bétons a été initiée dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, puis rapidement adoptée par les grands groupes industriels japonais tels que Kajima, Taisei, et Obayashi pour des projets d'envergure.

La popularité croissante de ces bétons repose sur deux avantages techniques et économiques majeurs : ils facilitent la mise en œuvre en réduisant le temps et la main-d'œuvre nécessaires, tout en permettant l'utilisation de coffrages complexes et densément armés. De plus, ils

améliorent la qualité du béton en termes de résistance et de durabilité, indépendamment du savoir-faire des ouvriers.

L'intérêt pour ce type de béton s'est développé progressivement dans d'autres pays quelques années après son introduction au Japon, mais il est actuellement en plein essor. En France, le LCPC s'est penché sur ce sujet au début des années 90, et les premières applications à grande échelle ont débuté en 1988 à Brest, notamment pour la construction de voiles courbes de grande hauteur fortement armés à Océanopolis, ainsi que pour un collège aux façades inclinées et formes complexes non répétitives.

Les chercheurs japonais et les industriels n'ont pas immédiatement publié leurs recherches, cherchant d'abord à prouver la viabilité des bétons autoplaçants. Des équipes de recherche et développement ont confirmé ces avancées à travers des réalisations à grande échelle, consolidant ainsi plus d'une décennie de travail au Japon. Aujourd'hui, le défi consiste à maîtriser la formulation des bétons autoplaçants dans différentes classes de résistance tout en restant compétitif en termes de coût, en tenant compte à la fois des spécifications techniques et des matériaux disponibles. [1] [2] [3]

## **2. Définition d'un béton autoplaçant :**

Le béton autoplaçant se distingue principalement du béton conventionnel par ses caractéristiques à l'état frais. Il se présente sous forme fluide et uniforme, capable de se mettre en place sans besoin de vibration. Il peut s'écouler sous son propre poids, indépendamment des contraintes du milieu, et maintient son homogénéité durant l'écoulement et après sa mise en place, évitant ainsi tout phénomène de ségrégation dynamique ou statique. Cette homogénéité, associée à sa résistance à la ségrégation et à sa stabilité, assure la solidité et la durabilité des structures construites avec ce matériau.

Pour obtenir cette fluidité, l'approche ne consiste pas à augmenter la quantité d'eau, ce qui pourrait causer la ségrégation et diminuer les performances. Au contraire, elle réside dans la recherche d'une composition optimale entre les différents constituants (gravier, sable, ciment, eau, ajouts et adjuvants), tout en garantissant l'absence de ségrégation et de ressuage. Les bétons autoplaçants sont formulés de manière distincte des bétons classiques, avec un dosage élevé en sable, ciment et éléments fins, ainsi que l'ajout d'adjuvants chimiques et minéraux pour ajuster leurs propriétés. Les granulats utilisés sont sélectionnés pour leur dimension limitée, afin d'éviter la formation de ponts qui pourraient entraver l'écoulement du matériau. [4] [5] [6]

### 3. Domaine d'application du béton autoplaçant :

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 [7]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, planchers, poutre, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.). Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

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

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

- Le pont Akashi Kaikyo (photo01), le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994)



*Figure 1.1 : Le pont Akashi Kaikyo*

- La tour Landmark Tower (photo02), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll.1995)



Figure 1.2 : La tour Landmark Tower

#### 4. Mise en œuvre et précaution d'emploi de BAP :

Le béton autoplaçant (BAP) est un matériau de construction hautement fluide, homogène et stable qui se met en place et se compacte naturellement sous l'effet de la gravité, simplifiant ainsi sa mise en œuvre sur les chantiers. Pour utiliser efficacement du béton autoplaçant, plusieurs précautions doivent être prises :

- **Étanchéité du coffrage** : Assurez-vous que le coffrage est parfaitement étanche pour éviter toute fuite de béton par les parois ouvertes. Cela peut être réalisé en utilisant des matériaux imperméables ou en assurant une fermeture hermétique du coffrage.
- **Treillis en fer** : Placez des treillis métalliques dans les zones de coulage pour renforcer la structure à construire. Cela facilite également la mise en place du béton autoplaçant.
- **Vitesse de coulage** : Contrôlez la vitesse de coulage pour éviter la formation de bulles d'air. Un coulage modéré garantit une meilleure qualité du béton.
- **Hauteur de chute** : Limitez la hauteur de chute du béton pour prévenir la formation de bulles d'air et les variations de consistance.
- **Ajout d'eau** : Évitez d'ajouter de l'eau pour ajuster la consistance du béton, car cela peut compromettre sa performance globale.
- **Prévention de l'évaporation** : Protégez le béton pour empêcher l'évaporation de l'eau en utilisant des plastiques ou des membranes étanches.
- **Contrôle de la qualité** : Effectuez des tests de consistance, de densité et de résistance à la compression pour assurer la qualité du béton autoplaçant avant et pendant la mise en œuvre.

## **5. Cahier des charges d'un béton autoplaçant :**

La spécificité des bétons autoplaçants (BAP) réside essentiellement dans leur comportement à l'état frais. Ce type de béton doit être hautement ouvrable et déformable tout en conservant sa stabilité, assurant ainsi la durabilité et la qualité des structures [2]. Le cahier des charges pour un BAP stipule des propriétés rhéologiques précises : il doit pouvoir s'écouler sous son propre poids sans nécessiter de vibration, même à travers des zones confinées et des coffrages complexes. Le béton doit présenter des caractéristiques de fluide binghamien avec un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles, afin de garantir un écoulement continu et homogène.

La résistance à la ségrégation dynamique est cruciale pour maintenir l'homogénéité du mélange ; en cas de mortier insuffisamment résistant, les gravillons peuvent se séparer, formant des voûtes qui bloquent l'écoulement. De plus, une bonne résistance à la ségrégation statique, au tassement et au ressuage est indispensable pour préserver l'homogénéité du béton une fois mis en place jusqu'à sa prise.

La formulation des BAP est complexe car elle nécessite de concilier la fluidité nécessaire à leur mise en place sans vibration et la stabilité indispensable pour éviter la ségrégation et le ressuage [8]. Pour atteindre cet équilibre, il est nécessaire d'ajouter des agents de viscosité, d'augmenter les ajouts minéraux, et de sélectionner avec soin les proportions de sable et de granulats. La composition de la pâte de ciment joue également un rôle crucial dans le comportement rhéologique du béton.

Les bétons autoplaçants offrent l'avantage d'améliorer la déformabilité du mélange pour faciliter sa mise en œuvre sans vibration, tout en maintenant une stabilité élevée contre la ségrégation et le ressuage, grâce à une formulation minutieuse et adaptée aux exigences spécifiques de chaque projet.

## **6. Spécificité de la composition d'un béton autoplaçant :**

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [9], soit :

### **6.1. Un volume de pâte important**

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air)

étant précisément d'écartier les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé (figure I.3).

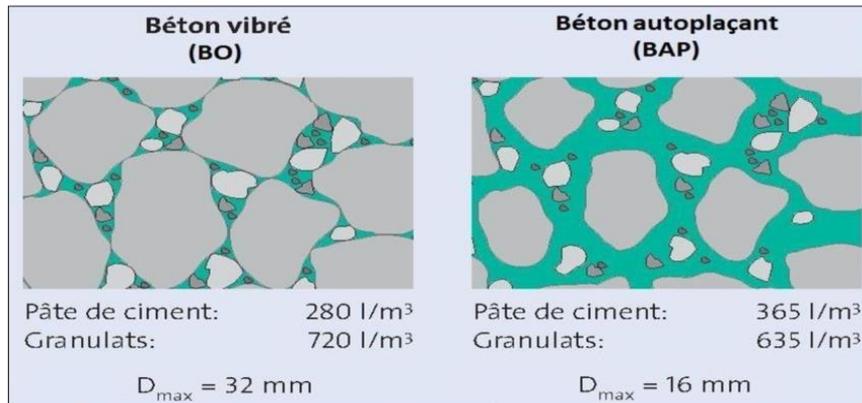


Figure 1.3 : Dispersion les granulats par excès de pate

## 6.2. Une quantité de fines (<80um) importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m<sup>3</sup>) supérieure à celle des bétons conventionnels. Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est déterminé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours, des critères de durabilité et des paramètres d'ouvrabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme XP P 18-305, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

## 6.3. L'utilisation des superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

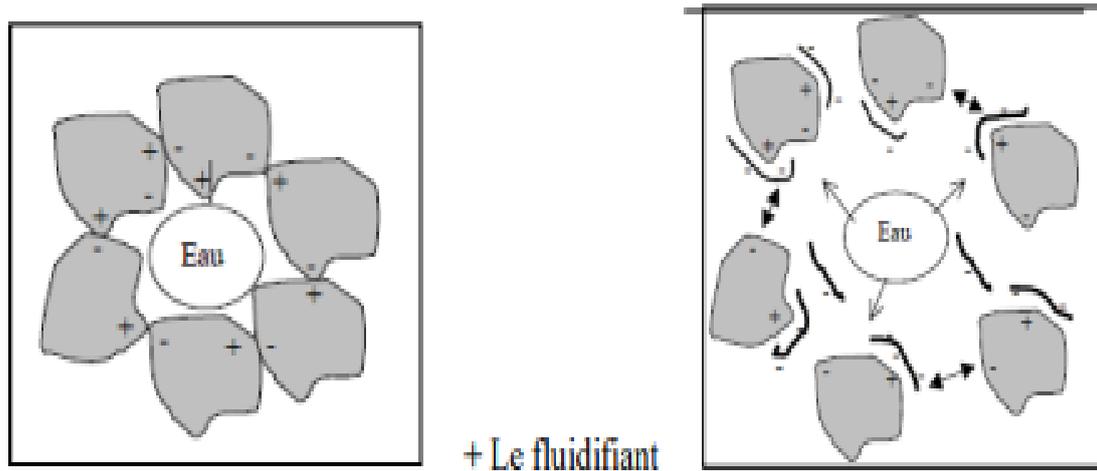


Figure 1.4 : Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment

#### 6.4. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)

L'adjonction d'un superplastifiant dans les bétons autoplaçants (BAP) a pour effet d'améliorer leur ouvrabilité tout en réduisant leur viscosité. Pour compenser cet effet, les BAP incluent souvent des agents de viscosité, comme des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces agents interagissent avec l'eau pour augmenter sa viscosité, jouant un rôle similaire aux fines en épaisissant la pâte. Cette mesure vise à prévenir le ressuage et à réduire les risques de ségrégation des granulats, notamment dans les bétons à haut rapport eau/liant où les fines seules pourraient ne pas suffire à retenir l'eau dans le mélange.

#### 6.5. Un faible volume de gravillon

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

## **7. Caractérisation d'un béton auto plaçant :**

### **7.1. Propriétés des BAP à l'état frais**

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [10], [11].

#### **7.1.1. Le remplissage**

La capacité de remplissage du béton, aussi appelée déformabilité, dépend directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant peut remplir efficacement les vides et les espaces restreints grâce à sa capacité à se déformer sous son propre poids, sans nécessiter de contraintes externes. Ce remplissage se mesure selon deux aspects : la capacité de déformation, qui indique le pourcentage de vide rempli ou la distance atteinte dans l'espace, et la vitesse de déformation, qui reflète la rapidité d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams est utilisé pour évaluer ces deux aspects [10].

#### **7.1.2. La résistance à la ségrégation**

La ségrégation d'un mélange désigne l'absence d'homogénéité dans la répartition de ses constituants, entraînant généralement une séparation entre phases solides et liquides, ou une ségrégation des phases solides selon leur dimension [12], [13]. Dans le béton, la ségrégation peut se manifester de plusieurs manières : la séparation entre la pâte et les granulats, la ségrégation entre le gravier et le mortier pouvant entraîner un blocage dans les zones confinées, ainsi qu'une répartition non uniforme de l'air occlus.

Pour prévenir la ségrégation, il est essentiel de réduire la quantité d'eau libre dans le béton en diminuant le rapport E/C (eau/ciment). De plus, augmenter la viscosité de la suspension d'eau peut renforcer la résistance à la ségrégation, en utilisant des agents de viscosité adaptés.

#### **7.1.3. La capacité de passage**

Le béton autoplaçant doit simultanément posséder une bonne fluidité (capacité de remplissage) et une résistance efficace à la ségrégation pour garantir un écoulement optimal. Cependant, dans les environnements confinés, le béton doit pouvoir circuler dans des espaces restreints et entre les armatures. Le blocage des granulats survient principalement en raison de la forte concentration de granulats dans le béton et de la taille des plus gros granulats par rapport aux espaces entre les armatures ou dans les zones confinées [10]. Le processus de blocage peut

être visualisé dans la figure I.6 ci-dessous, illustrant le béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

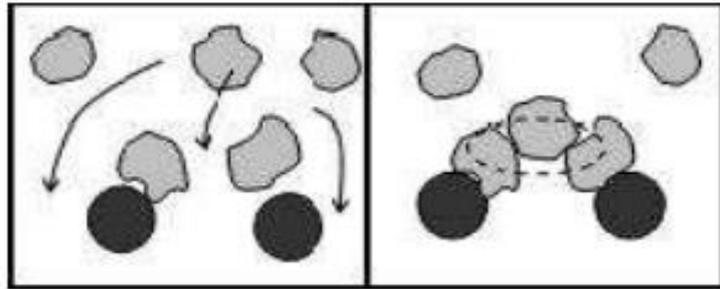


Figure 1.5 : Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment

Donc, un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau I.5.

Tableau 1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP

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

## 7.2. Propriétés des BAP à l'état durci

Dans cette partie, nous résumons rapidement les différences qui existent entre les propriétés des bétons autoplaçants à l'état durci et celles des bétons ordinaires. Elles sont étudiées sous deux aspects, les propriétés mécaniques d'une part et physico-chimiques (durabilité) d'autre part. Les principaux résultats présentés proviennent de la recherche effectuée au sein du LMDC [14], [15]. Des résultats expérimentaux ont été obtenus sur plusieurs séries d'échantillons, constitués des mêmes matériaux, même squelette granulaire (sauf les BHP), et de classes de résistance relatives à des bétons de bâtiment (20 MPa), des bétons d'ouvrage (40 MPa) et des bétons à hautes performances BHP (60 MPa).

- **Propriétés mécaniques :**

- **Résistance mécanique**

Considéré comme un mélange diphasique à l'état frais (composé de phases solide et liquide), le béton autoplaçant présente une structure plus uniforme que le béton traditionnel vibré, principalement grâce à sa haute résistance à la ségrégation, ce qui contribue à améliorer sa résistance mécanique. Souvent, les bétons autoplaçants montrent une résistance mécanique supérieure à celle d'un béton ordinaire ayant un rapport E/C similaire [15], [16]. L'introduction de fillers dans la formulation des BAP accélère leur développement de résistance mécanique aux premiers stades [17], [18]. Bien dispersées dans le béton, les fines particules des fillers favorisent l'hydratation du ciment, conduisant ainsi à une matrice cimentaire plus dense. Ces effets ont un impact significatif sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours, mais deviennent moins marqués par la suite.

- **Module d'élasticité statique (en compression)**

Les chercheurs ont comparé la résistance mécanique de bétons autoplaçants et de bétons ordinaires vibrés dans une étude [15]. Pour des rapports gravier sur sable (G/S) similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO. Cependant, lorsque les rapports G/S diffèrent, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Cette observation s'explique par le fait que les bétons autoplaçants contiennent une proportion plus élevée de pâte. En effet, le module d'élasticité d'un béton dépend des volumes relatifs de ses composants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte étant significativement inférieur à celui des granulats).

- **Retrait au jeune âge (0-24 heures)**

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [15]. Le

retrait au jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

- **Retrait à l'état durci**

En conditions de dessiccation, les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires vibrés montrent généralement un retrait total similaire. Cependant, une différence apparaît pour les bétons à haute performance (BHP), où le retrait des BAP est plus élevé. En mode endogène, à 28 jours, les bétons autoplaçants et ordinaires affichent un retrait comparable. Au-delà d'un an, les BAP montrent un retrait légèrement supérieur à celui des BO. Ces légères variations de retrait entre les deux types de béton sont probablement dues à un volume de pâte plus élevé dans les bétons autoplaçants [15].

- **Déformations et fluage**

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [15]. Les déformations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement supérieurs dans le cas des bétons autoplaçants [14], sauf pour la gamme de résistance relative aux bétons de bâtiment pour lesquels ces paramètres sont identiques entre BAP et BO.

• **Propriétés physico-chimiques**

Dans le domaine physico-chimique, les essais expérimentaux ont comparé diverses propriétés entre les deux types de béton (BAP et BO), en fonction de leur résistance mécanique. Les bétons autoplaçants montrent une perméabilité à l'oxygène plus faible que celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en ce qui concerne la diffusion des ions chlore et l'absorption d'eau par capillarité à résistance équivalente. De même, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium demeurent comparables pour les deux types de béton, évoluant de manière similaire avec la résistance en compression [15].

## **8. Constituants de béton autoplaçant :**

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral. [9] [6]

### **8.1. Les granulats**

Les BAP utilisent des granulats soit roulés soit concassés, et comme dans le cas des bétons ordinaires, la forme des granulats influence leur comportement rhéologique. Les granulats roulés présentent un coefficient de frottement plus faible que les granulats concassés. De plus, les granulats roulés ont des vides inter granulaires plus petits, nécessitant ainsi une moindre quantité de pâte de ciment pour les remplir. Cependant, en ce qui concerne le sable, en raison des préoccupations liées à la surexploitation des gisements, l'utilisation de sable concassé est préférée à celle de sable roulé. Le sable concassé est obtenu après une série d'opérations de concassage sur des roches extraites des carrières, permettant d'obtenir une granulométrie presque uniforme selon des critères de criblage spécifiques. En revanche, le sable roulé est généralement plus mono granulaire en termes de granulométrie. De plus, le sable concassé apporte au mélange une proportion significative de fines qui améliorent la maniabilité, la compacité, la résistance et la durabilité du béton. En outre, les granulats concassés ont une meilleure intégration dans la pâte de ciment en raison de leur meilleure flottabilité, résultant en une surface spécifique plus élevée pour une masse donnée. Pour éviter tout risque de blocage lors du coulage, le diamètre maximal des granulats est généralement limité à 16 mm.

### **8.2. Le ciment**

Les BAP peuvent être réalisés avec la plupart des ciments, mais compte tenu des exigences de démoulage au jeune âge, le ciment le plus employé est le : CPA CEM I 52,5 ou 42.5.

### **8.3. Les ajouts minéraux**

Les ajouts minéraux sont définis par la norme européenne provisoire ENV 206 'Béton. Performance, production, mise en œuvre et critère de conformité' comme suit : 'Matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières'. [10] Il faut préciser que les améliorations et les propriétés particulières sont évidemment autres que celles qu'apporterait une poudre de même finesse considérée comme simple granulat. [16] [17] L'utilisation des ajouts minéraux a des bénéfices : fonctionnels, économiques et écologiques. [18]

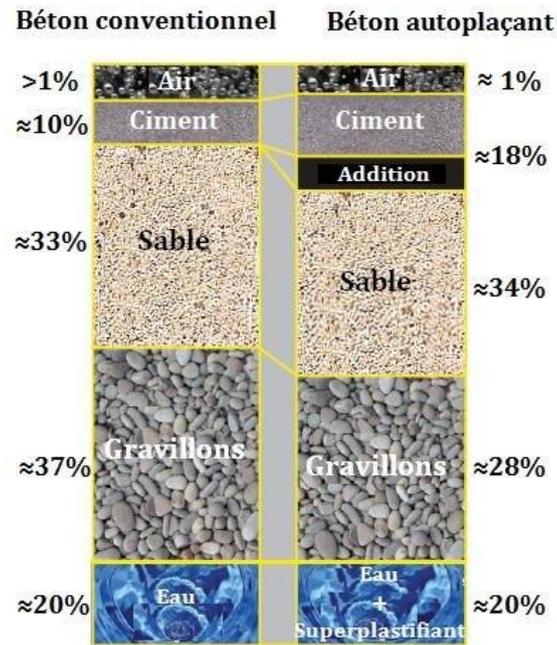


Figure 1.6 : Différence entre un béton conventionnel et un béton autoplaçant

## 9. Différents types des méthodes de formulations du BAP :

### 9.1. Méthode de formulation pratique des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée [19], [20], [21], car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont les composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 250 à 400 kg/. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation. La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

## **9.2. Formulations des BAP existants dans la bibliographie**

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

### **9.2.1. Approche japonaise**

Dans l'approche japonaise, développée principalement à l'Université de Tokyo par Okamura, Ozawa et d'autres chercheurs [22], [23], [24], [25], [26], la formulation du béton suit une méthodologie spécifique. Initialement, le dosage du gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier sont fixés pour établir une base. Ensuite, l'optimisation de la pâte de ciment est entreprise afin d'améliorer les performances du béton et de répondre aux critères d'ouvrabilité requis.

Le volume de gravier est fixé à 50% du volume des solides total dans le béton pour éviter les risques de blocages, sous réserve que le mortier satisfasse aux critères d'ouvrabilité. Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume de sable est établi à 40% du volume total du mortier. Cependant, dans cette approche, le volume de gravier est souvent conservé à un niveau inférieur pour prévenir les blocages potentiels, ce qui peut entraîner des problèmes de retrait en raison du volume significatif de pâte.

Afin d'améliorer cette méthode, plusieurs modifications et développements ont été proposés. Par exemple, Edamatsu et ses collaborateurs [30] ont réussi à augmenter le dosage de sable dans le mortier en utilisant des additions minérales telles que des fillers calcaires, des cendres volantes et des laitiers de hauts fourneaux, réduisant ainsi le volume de pâte, particulièrement celui de ciment, dans le béton. D'autres chercheurs, travaillant avec des matériaux locaux, ont pu augmenter le volume de gravier jusqu'à 60% du volume total des solides dans le béton, tout en réduisant le volume total de pâte de 10% par rapport à l'approche générale, pour obtenir un béton autoplaçant (Pelova et al. [31]).

### **9.2.2. Approche CBI (suédoise)**

La méthode suédoise de formulation, développée par CBI (Cement och Betong Institutet) [27], [28], [29], se distingue par sa prise en compte des conditions spécifiques sur les chantiers. Cette approche vise à évaluer et à minimiser les risques de blocage des granulats dans les zones densément ferrillées. Elle optimise la taille maximale des granulats en fonction de l'espacement entre les armatures et du volume de granulats dans le béton.

Fondée sur des études réalisées par divers chercheurs ([32], [33], [34] - cités par [30]), cette méthode expérimente différents mélanges de pâte de ciment et de granulats de diverses tailles, traversant des espacements variés entre armatures. Ces études ont démontré qu'il existe pour chaque taille de granulats une proportion volumique critique en deçà de laquelle le risque de blocage est négligeable, et au-dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette proportion dépend de l'espacement entre les armatures par rapport à la taille des granulats, ainsi que de la forme des granulats (roulés ou concassés).

Selon cette méthode, le phénomène de blocage semble être indépendant de la nature de la pâte tant que celle-ci est suffisamment fluide. Les principales adaptations et extensions de la méthode CBI ont été proposées par Bui et ses collaborateurs [29], qui ont introduit un critère supplémentaire pour la formulation de bétons autoplaçants. Ils recommandent d'ajouter un volume de pâte supplémentaire pour assurer un espacement minimal adéquat entre les granulats, réduisant ainsi les frictions et les frottements entre eux.

### **9.2.3. Approche LCPC**

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran repose sur le modèle d'empilement compressible [35], [36], visant à optimiser la porosité du système formé par les grains solides. Selon ces chercheurs, un agencement optimal du squelette granulaire permet d'améliorer à la fois la résistance et l'ouvrabilité du béton. Ce modèle permet de prédire la compacité du squelette granulaire en fonction des caractéristiques des composants tels que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité intrinsèque.

Les auteurs ont développé une modélisation du comportement à l'état frais du béton en se basant sur la compacité de son squelette granulaire. Cette approche, fruit de quinze années de recherches, est simplifiée par l'utilisation d'un logiciel dédié (BétonlabPro 2) qui intègre tous les paramètres nécessaires au calcul de ces formulations [37]. Ce logiciel permet de formuler différents types de bétons, tels que les bétons à haute performance, les bétons ordinaires, les bétons secs pour démoulage immédiat et les bétons autoplaçants.

Les auteurs ont également étendu cette méthode de formulation pour inclure davantage de paramètres, notamment les propriétés des bétons à l'état durci telles que le retrait, le fluage, le module d'élasticité, ainsi que la résistance à la traction et à la compression [38].

#### 9.2.4. Approche AFGC :

L'AFGC (Association Française de Génie Civil) propose une méthode de formulation spécifique pour le béton autoplaçant (BAP), qui est conçue pour répondre aux exigences particulières de ce matériau en termes d'écoulement sans vibration et de résistance à la ségrégation. Voici les principaux éléments de la méthode de formulation de l'AFGC pour le BAP :

- La méthode vise à formuler un béton autoplaçant qui combine une grande fluidité pour un écoulement sans effort de vibration et une stabilité pour éviter la ségrégation des constituants
- Choix du type de ciment adapté aux exigences du projet en termes de résistance et de durabilité.
- Utilisation de fillers (comme les fillers calcaires, les cendres volantes, etc.) pour ajuster les propriétés rhéologiques du béton et améliorer la compacité de la pâte de ciment.
- Sélection des granulats appropriés (graviers et sables) en fonction de leur taille, de leur forme et de leur distribution granulométrique pour optimiser l'écoulement du BAP tout en minimisant le risque de blocage.
- Utilisation d'agents superplastifiants et d'agents de viscosité pour ajuster la rhéologie du mélange, améliorer l'ouvrabilité et réduire la ségrégation.
- Le dosage des différents composants (ciment, fillers, granulats, adjuvants) est déterminé selon des critères précis pour assurer une performance optimale du BAP en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'écoulement.
- Des essais préliminaires et des tests de performance sont réalisés pour évaluer la consistance, la résistance à la ségrégation, la résistance mécanique et d'autres propriétés du BAP formulé selon la méthode de l'AFGC.

Cette méthode de formulation développée par l'AFGC est adaptée aux besoins spécifiques des projets de construction nécessitant l'utilisation de bétons autoplaçants. Elle intègre des considérations techniques avancées pour garantir la qualité et la fiabilité du matériau tout au long de sa mise en œuvre et de sa durée de vie dans les structures.

## 10. Essai de caractérisations de BAP :

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

### 10.1. Essais de fluidité :

#### - Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams)

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône (figure I.7) [11]. Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [39], [40]. Ceci permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

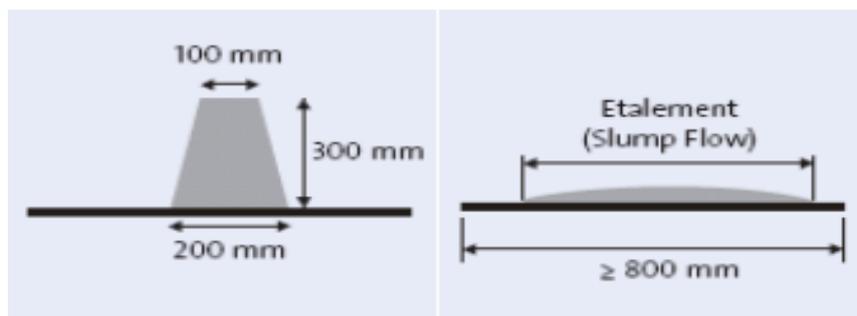


Figure I.7 : Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams)

#### - Mesure de la vitesse d'étalement (Essais au cône d'Abrams)

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T50, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T50 traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7

secondes [41], [42]. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation [43], [44].

## 10.2. Ségrégation dynamique

### - Essai de la boîte en L

La boîte en L permet de caractériser la mobilité du béton frais en milieu confiné (ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton se fait sans blocage, ni formation de voûtes au voisinage des armatures. Lors de l'écoulement d'un BAP, les risques de séparation de la phase granulaire de la pâte sont très élevés, notamment en présence d'armatures. Au coulage du béton, la trajectoire des granulats se trouve modifiée, les granulats ont tendance à converger vers les mêmes endroits en formant des voûtes au voisinage des armatures bloquant alors l'écoulement du béton. Le principe de cet essai (figure I.8), est de remplir entièrement la partie verticale de la boîte, laisser le béton se reposer 1 mn puis enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferrailage. On mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le taux de remplissage  $H_2/H_1$ .

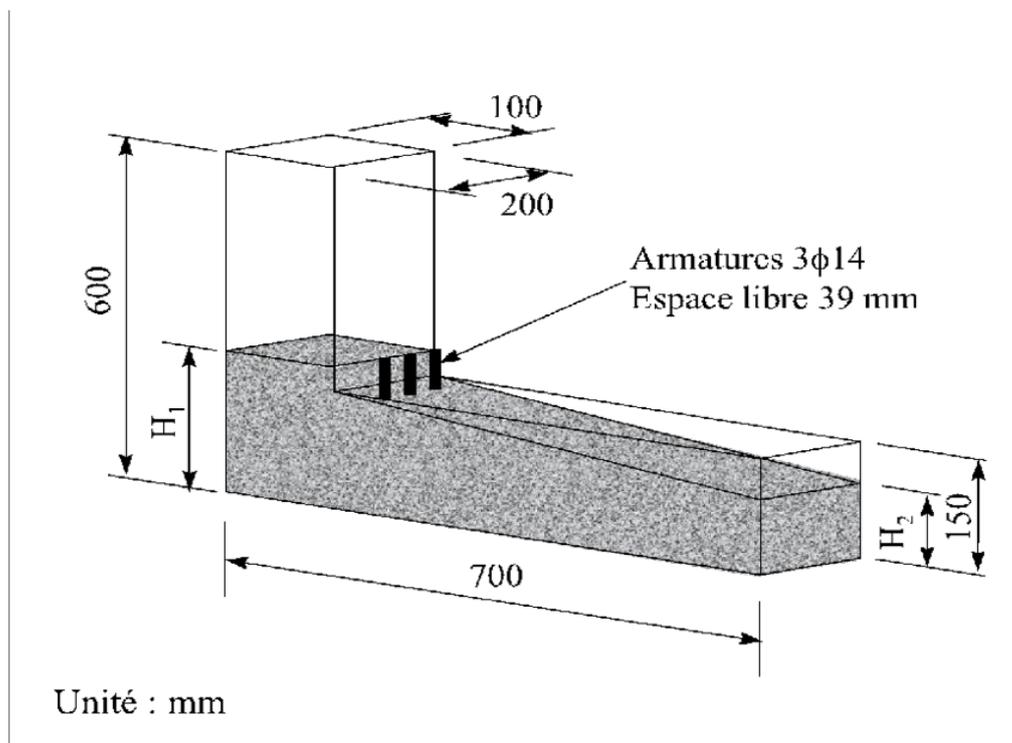


Figure I.8 : Essai de la boîte en L

### - Essai de la stabilité au tamis

Une résistance à la ségrégation statique se traduit par la capacité qu'a un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement des particules par gravité, ni ressuage. Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.9). L'essai est développé par la société « GTM construction », il permet de qualifier les BAP vis à vis du risque de ségrégation. Il s'agit de verser 10 litre du béton juste après le malaxage dans un sceau, puis couvrir le sceau pour protéger le béton de la dessiccation et laisser reposer durant 15 mn. Verser 5 kg du béton au centre d'un tamis 5mm, à une hauteur de chute de 50cm, on récupère le béton passant dans un récipient. Après 2mn On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant au travers le tamis [45].

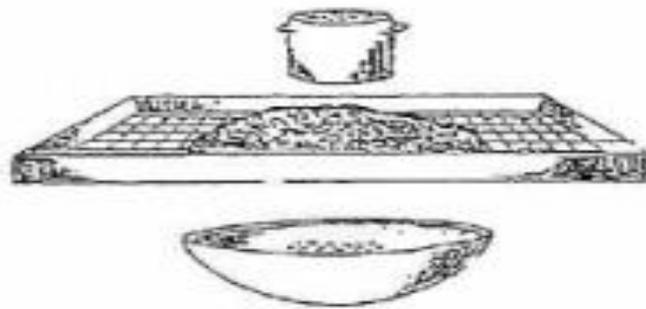


Figure 1.9 : Essai de la stabilité au tamis

### Critères d'acceptabilité :

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

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

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

$P \text{ laitance} > 30\% \rightarrow$  stabilité très mauvaise. Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

### 10.3. Ressuage

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

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

## **11. Fabrication, transport et mise en place des BAP**

### **11.1. Fabrication des BAP**

Tous les types de malaxeurs peuvent être utilisés pour fabriquer des bétons autoplaçants (BAP). Lors de l'incorporation des différents composants dans le malaxeur, il est recommandé d'appliquer des consignes similaires à celles utilisées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales spécifiques à chaque projet. Des facteurs tels que l'intensité et la durée du malaxage, ainsi que l'ordre d'introduction des constituants, jouent un rôle crucial dans l'obtention de l'homogénéité du béton et dans l'efficacité des ajouts et adjuvants. Par conséquent, un temps de malaxage standard de 120 secondes est fixé, mais cette durée peut être ajustée en fonction de la performance spécifique du malaxeur utilisé. [46].

### **11.2. Transport des BAP**

En raison de sa haute fluidité, le béton autoplaçant nécessite d'être transporté en camion malaxeur. Comme pour le béton vibré, sa fluidité peut être affectée pendant le transport, ce qui dépend de plusieurs paramètres tels que le type d'adjuvant utilisé, la durée du transport, le dosage en eau et la température. Ces modifications peuvent être partiellement corrigées pour maintenir les caractéristiques d'ouvrabilité requises au moment du déchargement sur le chantier. L'ajout d'adjuvants dans le camion doit strictement respecter le temps de malaxage minimal recommandé afin de garantir une dispersion optimale de l'adjuvant dans l'ensemble du béton chargé. En revanche, tout ajout d'eau est à éviter absolument. [47].

### **11.3. Mise en place**

Comparé au béton vibré, la mise en place du béton autoplaçant est considérablement simplifiée, pouvant être réalisée par une seule personne à travers trois méthodes distinctes :

1. La première méthode utilise une goulotte, similaire à celle employée pour les bétons ordinaires vibrés. Afin de prévenir la ségrégation, il est essentiel de limiter la hauteur de chute maximale du béton à 5 mètres.
2. La deuxième méthode implique l'utilisation d'un tube plongeur immergé dans le béton frais, placé dans la partie inférieure du coffrage.

3. La troisième méthode consiste à pomper le béton autoplaçant, ce qui réduit la formation de bulles d'air et permet d'obtenir des surfaces lisses.

Pour garantir la réussite des ouvrages en béton autoplaçant, il est crucial de respecter rigoureusement les recommandations concernant la fabrication, le transport et la mise en œuvre. [48].

## Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants, l'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage)

. Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation
- Capacité de passage dans les milieux confinés
- Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

A l'état durci, le béton doit garantir une durée de vie prolongée de la structure et des performances mécaniques donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont exigées pour celui-ci.

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

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau. En effet, le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques.

Depuis l'invention du béton autoplaçant, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée.

Toutes les méthodes trouvées dans la littérature demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP.

# **Chapitre 2 : Étude Expérimentale**

## Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche. La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituant sont bien caractérisés,

Ensuite faire des essais indiquant l'état frais du BAP selon l'expérience acquise ces dernières années.

Enfin, on a décrit la préparation des éprouvettes et le matériel pour la réalisation des Essais mécaniques instantanés.

## 1. Matériaux Utilise

### 1.1. Ciment

Le ciment utilisé est du type CEM II/A-M [S-L] 42.5 R provenant de la cimenterie de GICA – Ma Labyed a Tébessa. Ce ciment est un ciment Portland composé de 90% de clincker et de 10% de calcaire, sa résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa.



Figure 2.1 : le ciment utilise dans l'étude

### 1.2. Granulas

Sont utilisés dans cette étude des granulats concassés provenant d'une carrière. Ils sont de trois classes granulaires : Sable 0/3, Gravier 3/8 et Gravier 8/15.

### 1.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est celle du robinet.

### 1.4. Adjuvant (superplastifiant)

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité qui sont nécessaires à l'obtention d'un BAP.

L'adjuvant qui sera utilisé est un super-plastifiant haut réducteur d'eau à base de poly carboxylates modifiés type SIKAPLAST 40 PRO, de pH = 4.5 +/- 1.0, de teneur en chlore < 0.1% g/L et densité = 1.055 +/- 0.015 (%). Dosage d'utilisation recommandé varie de 0.7 à 2.5 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées

Voir la fiche technique en annexe A pour plus d'indications sur ce produit.



Figure 2.2 : Le superplastifiant SIKAPLAST 40 PRO

### 1.5. Ajouts minéraux

Le verre est un solide amorphe et transparent composé principalement de dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) et fabriqué à partir de sable, de soude (carbonate de sodium) et de chaux (oxyde de calcium). Isolant électrique, ce qui le rend utile dans de nombreuses applications électriques et électroniques.

Il est résistant à de nombreux produits chimiques, ce qui le rend approprié pour le stockage de substances corrosives.

Le verre est entièrement recyclable et peut être fondu à nouveau pour fabriquer de nouveaux produits en verre, ce qui en fait un matériau respectueux de l'environnement.

En résumé, le verre est un matériau largement utilisé dans la construction, l'emballage, l'optique, l'électronique, et bien d'autres domaines en raison de ses propriétés uniques de transparence, de résistance et de recyclabilité.

On a plusieurs types de verre :

- Verre ordinaire (ou sodocalcique)
- Verre borosilicaté
- Verre à base de plomb (cristal)
- Verre trempé
- Verre feuilleté
- Verre émaillé
- Verre optique

Chaque type de verre est adapté à des applications spécifiques en fonction de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

Les deux types d'additions récupérées de déchets de verre au cours de cette étude sont :

- **La poudre de verre**



*Figure 2.3 : La poudre de verre <math><0.008\text{ mm}</math>*

**Verre granulaire** : Le granulat de verre est un matériau constitué de verre broyé en très petites particules de diamètre entre 1.25mm et 1.60 mm.



*Figure 2.4 : Le verre en cas granulat*

Pour le broyage du verre, nous avons utilisé un broyeur à boulets (Figure 2.5) de vitesse de 56 tr/min (laboratoire du MC à Tébessa), puis le verre a été tamisé en utilisant un tamis 80  $\mu$ m et deux tamis 1.25 mm et 1.60 mm.



*Figure 2.5 : Machine los Angeles ( operation de concassage du verre)*

## 2. Essai sur granulas

### 2.1. Échantillonnage des matériaux :

Le but principal de l'échantillonnage est de conduire au prélèvement d'une fraction représentative de tout le matériau envoyé au laboratoire pour effectuer les essais.

L'opération d'échantillonnage peut se faire par quartage ou à l'aide d'un diviseur (échantillonneur).

### 2.2 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de classer, et de définir d'après la grosseur des grains qui les composent, les différents matériaux employés dans la construction. Pour effectuer ce classement, on se sert d'une série de tamis et de passoires, par définition, un tamis comporte des mailles carrées constituées par des fils qui se croisent, et une passoire comporte des trous ronds, pratiqués dans une tôle. Les résultats de l'analyse granulométriques sont représentés dans la courbe granulométrique. L'essai est effectué conformément à la norme française P 18-560 [40]. Les analyses granulométriques et les courbes granulométriques établies pour chaque fraction sont représentées dans les tableaux et figures suivants :



Figure 2.6 : Essai de tamisage des granulates

*Pour un gravier 3/8 :*

Tableau 2 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis	Refus	Refus cumule %	Refus cumule %2	Tamisat %
20	0	0	0	100
16	46	46	1,15	98,85
12,5	169	215	5,375	94,625
10	260	475	11,875	88,125
8	341	816	20,4	79,6
6,3	1347	2163	54,075	45,925
5	923	3086	77,15	22,85
0	911	3997	99,925	0,075

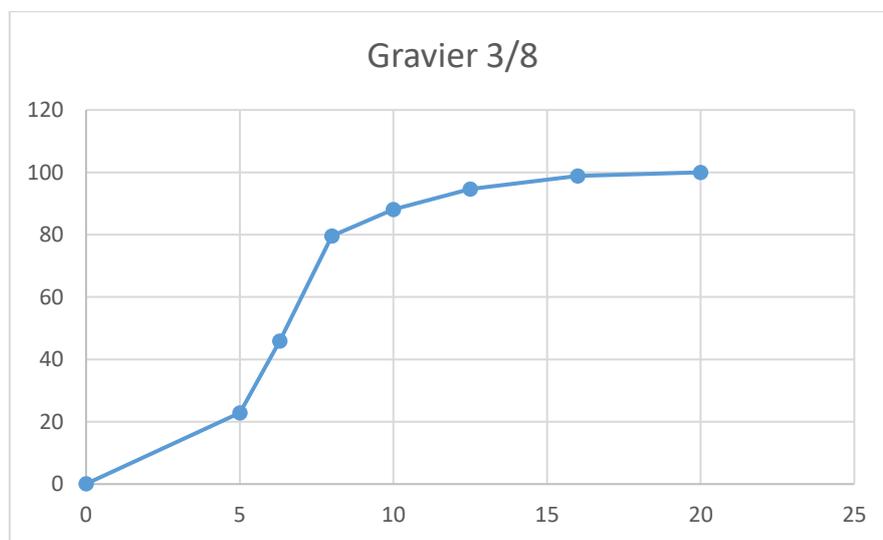


Figure 2.7 : Courbes granulométriques de gravier 3/8

**Pour un gravier 8/15 :**

Tableau 3 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum%	Tamisat %
25	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	906	906	22,65	77,35
14	972	1878	46,95	53,05
12,5	914	2792	69,8	30,2
10	1037	3829	95,725	4,275
8	111	3940	98,5	1,5
0	56	3996	99,9	0,1

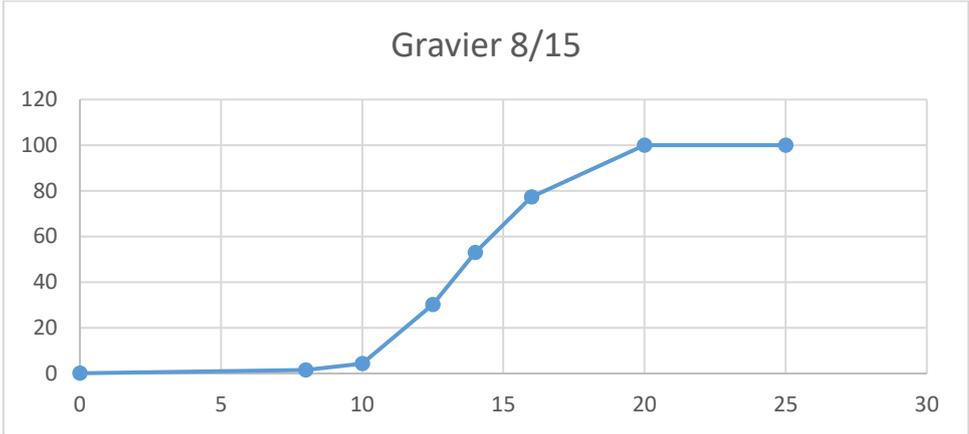
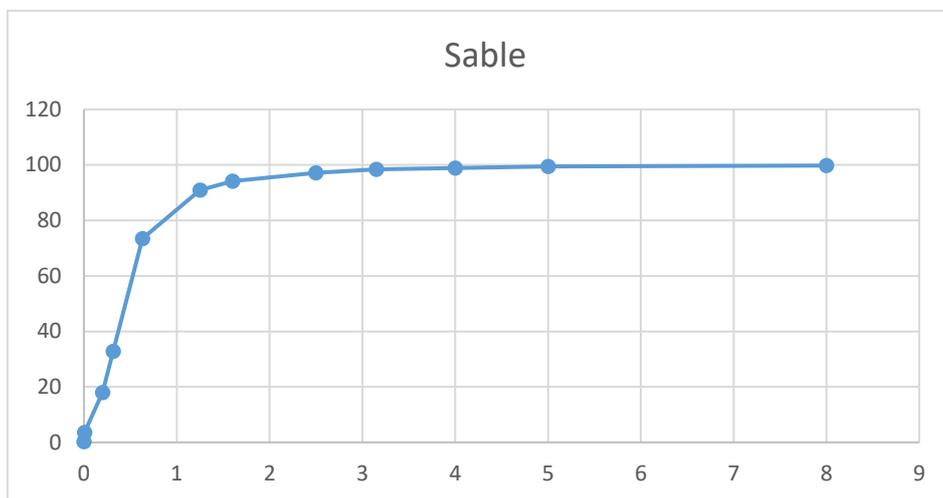


Figure 2.8 : Courbes granulométriques de gravier 8/15

**Pour sable 0/3 :***Tableau 4 : Analyse granulométrique du sable 0/3*

Tamis	Refus	Refus cum	Refus cum %	Tamisat %
8	5	5	0,25	99,75
5	7	12	0,6	99,4
4	11	23	1,15	98,85
3,15	10	33	1,65	98,35
2,5	25	58	2,9	97,1
1,6	59	117	5,85	94,15
1,25	65	182	9,1	90,9
0,63	349	531	26,55	73,45
0,315	812	1343	67,15	32,85
0,2	297	1640	82	18
0,008	288	1928	96,4	3,6
0	67	1995	99,75	0,25

*Figure 2.9 : Courbes granulométriques de sable 0/3***2.3. Masses volumiques absolue :**

La masse volumique absolue ou densité absolue est la masse par unité de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Elles sont déterminées selon les méthodes classiques, respectivement masse d'un certain volume de matériau et éprouvette graduée (ou bien le pycnomètre) [41,42]



Figure 2.10 : Épreuve graduée

Tableau 5 : la masse volumique absolue

Granulats	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
La masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.536	2.466	2.36

### 3. Formulation de BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années. Dans l'industrie du bâtiment, et par expérience on sait que ces résistances dites « ordinaires » sont facilement atteintes par les bétons autoplaçants.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- Le rapport E/C varie entre 0.38 et 0.42.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 250 à 400 kg/m<sup>3</sup>. En complément la masse d'addition se situe entre 60 et 120 kg/m<sup>3</sup>.

- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.
- Pour calculer les proportions des constituants pour un mètre cube, on fixe les rapports suivants :

$G/S = 1$  pour augmenter la quantité de sable, celle-ci permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier.

Le rapport  $E/C = 0,4$ , le dosage en ciment étant constant.

Dans  $1\text{m}^3$  de béton, on a les constituants suivants :  $G + S + C + E + A = 1000\text{ l}$

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a utilisé deux dosages de ce dernier :  $350\text{ kg/m}^3$  et  $400\text{ kg/m}^3$ .

Avec :

$E/C = 0.4$  avec  $C = 400\text{ kg/m}^3$  on a donc  $E = 160\text{ l/m}^3$

On obtient le volume de la pâte  $350\text{ l/m}^3$

Donc  $G + S = 1000 - 350 = 650\text{ l/m}^3$  ( $G/S = 1$ )

$G = S = 325\text{ l/m}^3$

On a deux types de graviers utilise donc :  $G\ 3/8 : 1/3 * 325 = 108.33\text{ l/m}^3$

$G\ 8/15 : 2/3 * 325 = 216.67\text{ l/m}^3$

Enfin en multiplier les dosages à la masse volumique absolue de chacun :

Pour sable 0/3 :  $325 * 2.536 = 801.45\text{ kg/m}^3$

Pour gravier 3/8 :  $108.33 * 2.466 = 267.141\text{ kg/m}^3$

Pour gravier 8/15 :  $216.67 * 2.36 = 511.341\text{ kg/m}^3$

Pour le dosage de superplastifiant on a :

0.7% de  $400\text{ kg/m}^3$  de ciment =  $2.8\text{ l/m}^3$

2.5% de  $400\text{ kg/m}^3$  de ciment =  $10\text{ l/m}^3$

## **Conclusion**

Le deuxième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux locaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, addition, superplastifiant, sable et gravier.) pour la confection du béton,

La formulation d'un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison des matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP (fluidité et homogénéité).

Les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de Tébessa.

# **Chapitre 3 : Résultats Expérimentaux et Interprétation**

## **Introduction**

Cette partie présente, les résultats des travaux expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de notre recherche, ainsi que leur interprétation. Il s'agit des essais de caractérisation propres aux BAP frais. Donc on a fait ces essais pour savoir l'effet des déchets sur les propriétés des BAP (à base des matériaux locaux).

Les essais ont été effectués selon les procédures décrites par l'AFGC. De plus, pour les essais d'étalement au cône et d'écoulement à la boîte en L.

### **1. La granulométrie des gravillons**

Dans la formulation des BAP, l'optimisation de la granulométrie des gravillons a une importance capitale, car elle peut avoir des effets considérables sur la maniabilité. En fait, la granulométrie désirée des BAP est essentiellement caractérisée par sa dimension maximale et ses proportions de grains de même dimension. Ces deux facteurs étant principalement fixés par une maximisation de la compacité et la capacité de remplissage des BAP. Cette phase consiste donc à sélectionner, en premier lieu, une classe granulométrique des gravillons se caractérisant par sa taille maximale, puis à trouver une combinaison massique des proportions de grains de même dimension déterminant la distribution granulométrique.

Avant de confectionner nos mélanges, nous avons mesuré, pour chaque combinaison des gravillons utilisés, la compacité obtenue dans une éprouvette cubique de (10\*10\*10 cm) remplie sans tassement ou vibration.

- Les mélanges utilisés dans cette étude sont :

Tableau 6 : Les différents mélanges utilisés

MELANGE	CIMENT	G/S	SP	DECHET
M1	400	1	0,70%	0%
M2	400	1	2,50%	0%
M3	400	1	0,70%	5% poudre
M4	400	1	0,70%	15% poudre
M5	400	1	2,50%	5% poudre
M6	400	1	2,50%	15% poudre
M7	400	1	0,70%	5% granulaire
M8	400	1	0,70%	15% granulaire
M9	400	1	2,50%	5% granulaire
M10	400	1	2,50%	15% granulaire
M11	350	1	0,70%	0%
M12	350	1	2,50%	0%
M13	350	1	0,70%	5% poudre
M14	350	1	0,70%	15% poudre
M15	350	1	2,50%	5% poudre
M16	350	1	2,50%	15% poudre
M17	350	1	0,70%	5% granulaire
M18	350	1	0,70%	15% granulaire
M19	350	1	2,50%	5% granulaire
M20	350	1	2,50%	15% granulaire

Dans les 20 mélanges nous utilisons :

Deux dosages du ciment : 350 kg/m<sup>3</sup> et 400 kg/m<sup>3</sup>.

Deux pourcentages de superplastifiant : 0.7% et 2.5%.

Deux pourcentages de déchet (soit poudre ou granulaire) : 5% et 15%.

Pour le calcul a 1m<sup>3</sup> on a :

Tableau 7 : les mélanges pour 1m<sup>3</sup>

MELANGE	CIMENT	SABLE	3//8	8//15	EAU	SP	DECHET
M1	400	801,45	267,141	511,341	158	2,8	0
M2	400	801,45	267,141	511,341	153	10	0
M3	400	801,45	267,141	511,341	166,04	2,8	20 P
M4	400	801,45	267,141	511,341	182,04	2,8	60 P
M5	400	801,45	267,141	511,341	161	10	20 P
M6	400	801,45	267,141	511,341	177	10	60 P
M7	400	801,45	267,141	511,341	166,04	2,8	20 G
M8	400	801,45	267,141	511,341	182,04	2,8	60 G
M9	400	801,45	267,141	511,341	161	10	20 G

M10	400	801,45	267,141	511,341	177	10	60 G
M11	350	801,45	267,141	511,341	138	2,45	0
M12	350	801,45	267,141	511,341	133	8,75	0
M13	350	801,45	267,141	511,341	145,285	2,45	17,5 P
M14	350	801,45	267,141	511,341	159,285	2,45	52,5 P
M15	350	801,45	267,141	511,341	140,875	8,75	17,5 P
M16	350	801,45	267,141	511,341	154,875	8,75	52,5 P
M17	350	801,45	267,141	511,341	145,285	2,45	17,5 G
M18	350	801,45	267,141	511,341	159,285	2,45	52,5 G
M19	350	801,45	267,141	511,341	140,875	8,75	17,5 G
M20	350	801,45	267,141	511,341	154,875	8,75	52,5 G

## 2. Malaxage des bétons

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est une bétonnière d'une capacité de 30 litres.



*Figure 3.1 : le bétonnière*

Le programme de malaxage comme suite :

- Introduction des granulats dans la bétonnière et pré-humidification pendant 1 minute avec une partie de la quantité d'eau de gâchage égale à 3% de la masse totale des granulats ;
- Introduction du liant équivalent (ciment + addition) et malaxage pendant 30 secondes avec les granulats ;

- Introduction de l'eau de gâchage restante avec une partie de l'adjuvant (super-plastifiant) puis malaxage pendant 90 secondes ;
- Introduction de la partie restante de l'adjuvant (super-plastifiant) et malaxage pendant 2 minutes.

### **3. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais**

Dans la suite du document 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 :

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

#### **3.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams**

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 3.2 : Essai d'étalement au cône d'Abrams

- **Objet d'étalement (slump flow)**

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

Tableau 8 : Les résultats d'essai d'étalement

MELANGE	P (mm)
M1	629
M2	703
M3	648
M4	655
M5	713
M6	701
M7	633
M8	637
M9	688
M10	691
M11	621
M12	684
M13	643
M14	649
M15	707
M16	691
M17	631
M18	627
M19	682
M20	686

### 3.2. Essai de stabilité au tamis

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.



Figure 3.3 : Essai de stabilité 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.

- **Peser le fond avec la laitance :**

- On a :  $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond}} + \text{laitance} - P_{\text{fond}}$
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.
- $\delta = (P_{\text{laitance}}/P_{\text{échantillon}}) * 100$

- **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 :

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

Tableau 9 : Les résultats d'essai de stabilité

MELANGE	D (%)
M1	6,28%
M2	6,30%
M3	4,53%
M4	4,44%
M5	6,64%
M6	6,63%
M7	4,32%
M8	4,68%
M9	6,53%
M10	6,59%
M11	4,28%
M12	5,97%
M13	4,47%
M14	4,38%
M15	6,33%
M16	6,26%
M17	4,11%
M18	4,31%
M19	6,29%
M20	6,32%

### 3.3. Essai de la boîte en « L »

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 (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$ . 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 3.4 : Essai de boîte L*

Tableau 10 : Les résultats d'essai boîte en L

MELANGE	H2/H1
M1	0,71
M2	0,86
M3	0,83
M4	0,85
M5	0,88
M6	0,87
M7	0,91
M8	0,89
M9	0,83
M10	0,85
M11	0,78
M12	0,84
M13	0,91
M14	0,92
M15	0,88
M16	0,86
M17	0,84
M18	0,89
M19	0,93
M20	0,84

### 3.4. Confection des éprouvettes

La moule utilisée pour la confection des éprouvettes est une moule en acier de forme :

- Cubique (10x10x10 cm)



Figure 3.5 : Les moules utilisés dans l'étude

Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après leur coulage, puis placées sous l'eau à une température de  $20 \pm 2$  °C



Figure 3.6 : Les éprouvettes conservées sous l'eau

#### 4. Présentation de résultats

A partir des mélanges obtenus, il faut procéder à différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés

##### 4.1. Etat frais

Après formulation, Les essais caractéristiques sur béton frais ont été réalisés juste après le gâchage. Ce sont ceux recommandés par l'AFGC. Une étude des propriétés du BAP est établie pour vérifier le comportement à l'état frais, qui se manifeste par l'étalement pour les milieux non confinés, ainsi que son écoulement dans les milieux confinés illustré dans la boîte en L et par la stabilité au tamis.

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de superplastifiant avec deux dosage de ciments et 0% déchets (SP : superplastifiant):

Tableau 11 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec deux pourcentages de superplastifiant

Mélange	Boite L (H2/H1)	Etalement (mm)	Stabilité (%)
M1 ( 0,7% SP ; 400 kg Ciment )	0,71	629	6,28%
M2 ( 2.5 % SP ; 400 kg Ciment )	0,86	703	6,30%
M3 ( 0,7% SP ; 350 kg Ciment )	0,78	621	4,28%
M4 ( 2.5% SP ; 350 kg Ciment )	0,84	684	5,97%

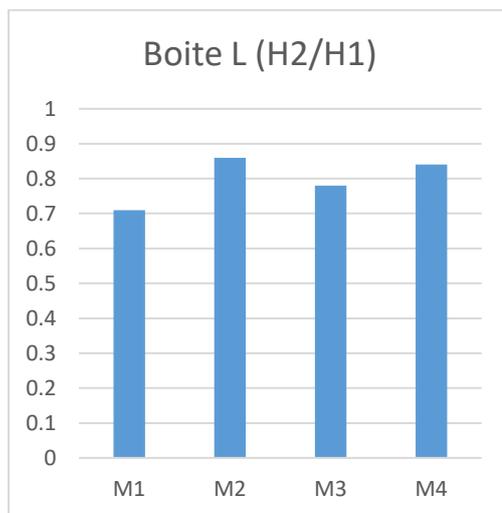


Figure 3.7 : Boite L en fonction de deux pourcentages superplastifiants

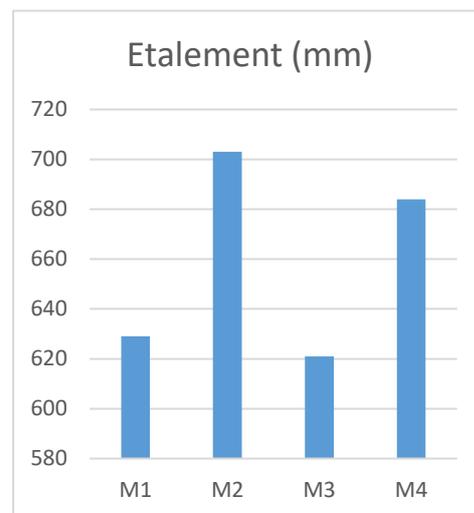


Figure 3.8 : Etalement en fonction de deux pourcentages superplastifiants

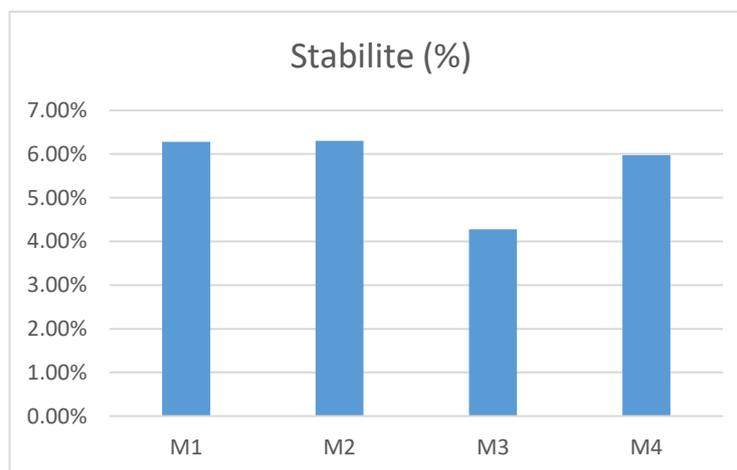


Figure 3.9 : Stabilité en fonction de deux pourcentages superplastifiants

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de superplastifiant avec deux dosages de ciments et 5% poudre de verre :

Tableau 12 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec deux pourcentages de superplastifiant et 5% poudre de verre

Melange	Boite L (H2/H1)	Etalement (mm)	Stabilité (%)
M1 ( 0,7% SP ; 5% poudre ; 400kg ciment )	0,83	648	4,53%
M2 ( 2,5% SP ; 5% poudre ; 400kg ciment )	0,88	713	6,64%
M3 ( 0,7% SP ; 5% poudre ; 350kg ciment )	0,91	643	4,47%
M4 ( 2,5% SP ; 5% poudre ; 350kg ciment )	0,88	707	6,33%

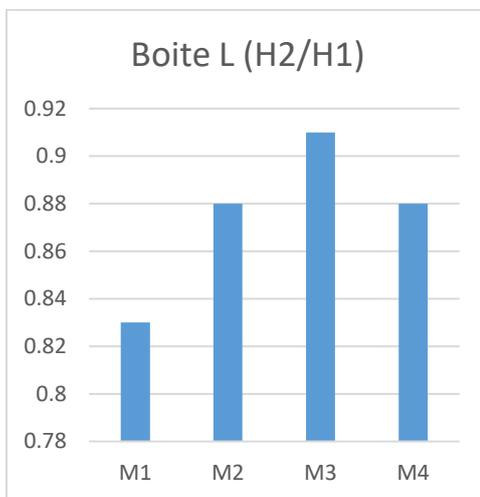


Figure 3.10 : Boite L en fonction de 5% poudre de verre

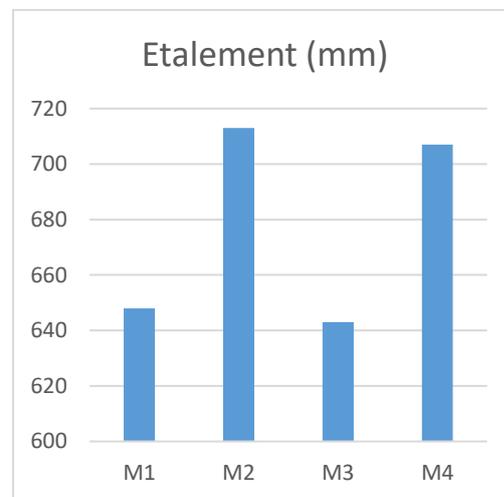


Figure 3.11 : Etalement en fonction de 5% poudre de verre

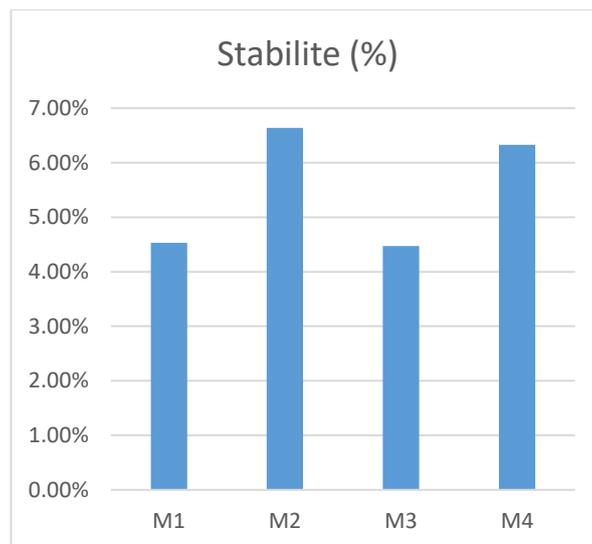


Figure 3.12 : Stabilité en fonction de deux pourcentage superplastifiant et 5% poudre de verre

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de superplastifiant avec deux dosages de ciments et 15% poudre de verre :

Tableau 13 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 15% poudre de verre

Melange	Boite L (H2/H1)	Etalement (mm)	Stabilité (%)
M1 ( 0,7% SP ; 15% poudre ; 400kg ciment )	0,85	655	4,44%
M2 ( 2,5% SP ; 15% poudre ; 400kg ciment )	0,87	701	6,63%
M3 ( 0,7% SP ; 15% poudre ; 350kg ciment )	0,92	649	4,38%
M4 ( 2,5% SP ; 15% poudre ; 350kg ciment )	0,86	691	6,26%

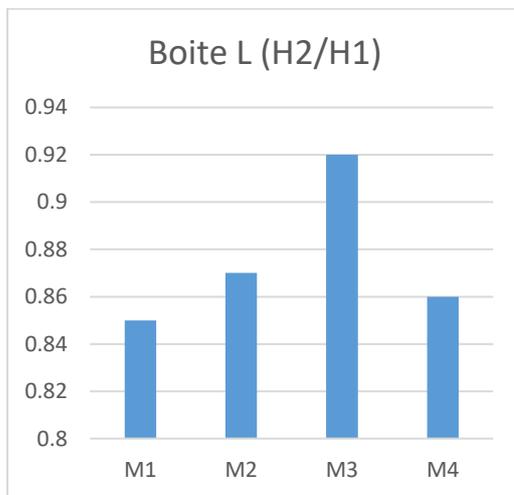


Figure 3.13 : Boite L en fonction de 15% poudre de verre

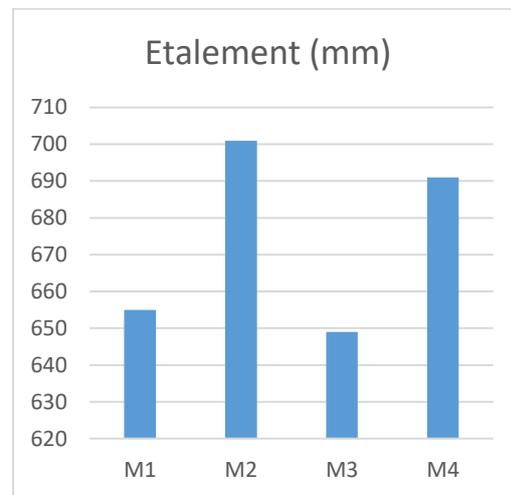


Figure 3.14 : Etalement en fonction de 15% poudre de verre

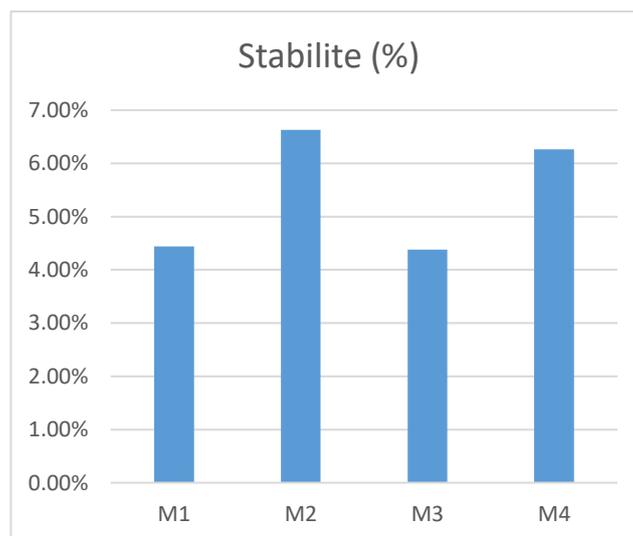


Figure 3.15 : Stabilité en fonction de 15% poudre de verre

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de superplastifiant avec deux dosages de ciments et 5% verre granulaire :

Tableau 14 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 5% verre granulaire

Melange	Boite L (H2/H1)	Etalement (mm)	Stabilité (%)
M1 ( 0,7% SP ; 5% V granulaire ; 400kg ciment )	0,91	633	4,32%
M2 ( 2,5% SP ; 5% V granulaire ; 400kg ciment )	0,83	688	6,53%
M3 ( 0,7% SP ; 5% V granulaire ; 350kg ciment )	0,84	631	4,11%
M4 ( 2,5% SP ; 5% V granulaire ; 350kg ciment )	0,93	682	6,29%

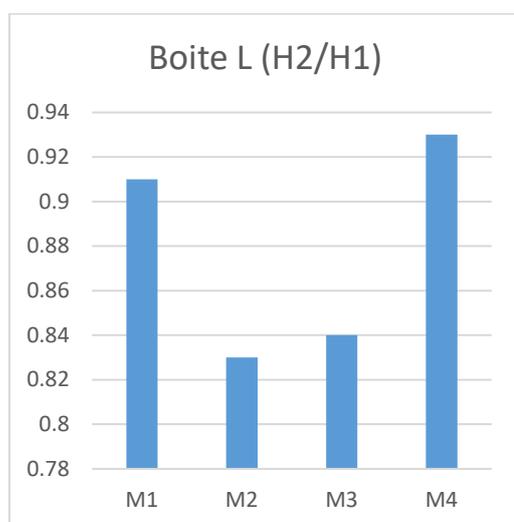


Figure 3.16 : Boite L en fonction de 5% verre granulaire

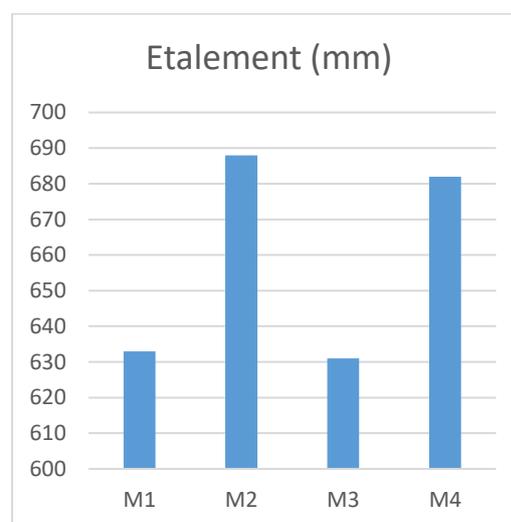


Figure 3.17 : Etalement en fonction de 5% verre granulaire

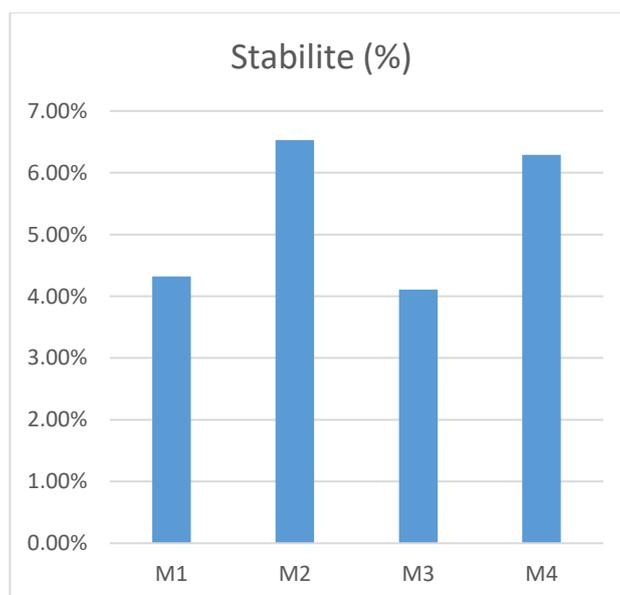


Figure 3.18 : Stabilité en fonction de 5% verre granulaire

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP pour différents pourcentages de superplastifiant avec deux dosages de ciments et 15% verre granulaire :

Tableau 15 : Caractéristiques rhéologiques des BAP avec 15% verre granulaire

Melange	Boite L (H2/H1)	Etalement (mm)	Stabilité (%)
M1 ( 0,7% SP ; 15% V granulaire; 400kg ciment )	0,89	637	4,68%
M2 ( 2,5% SP ; 15% V granulaire; 400kg ciment )	0,85	691	6,59%
M3 ( 0,7% SP ; 15% V granulaire; 350kg ciment )	0,89	627	4,31%
M4 ( 2,5% SP ; 15% V granulaire; 350kg ciment )	0,84	686	6,32%

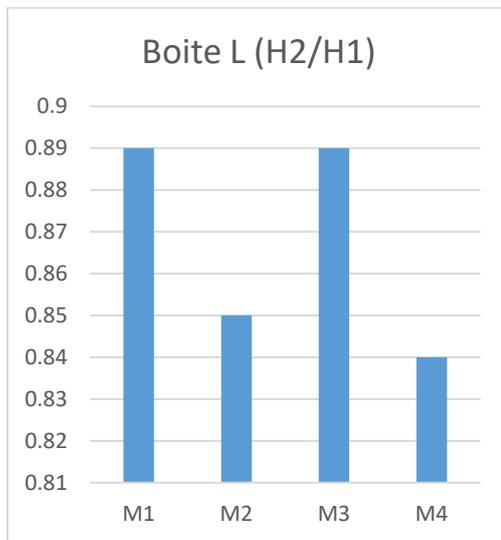


Figure 3.19 : Boite L en fonction de 15% verre granulaire

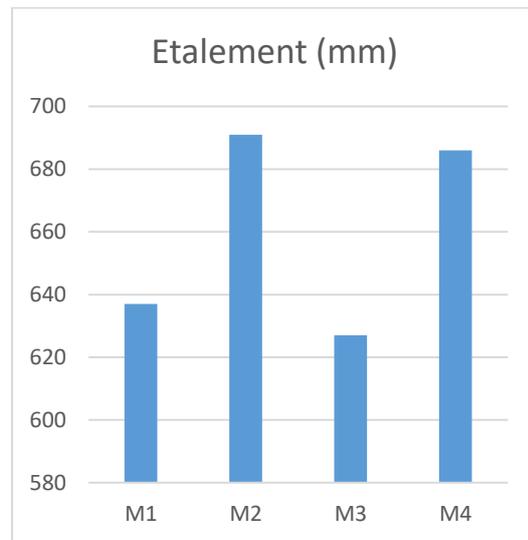


Figure 3.20 : Etalement en fonction de 15% verre granulaire

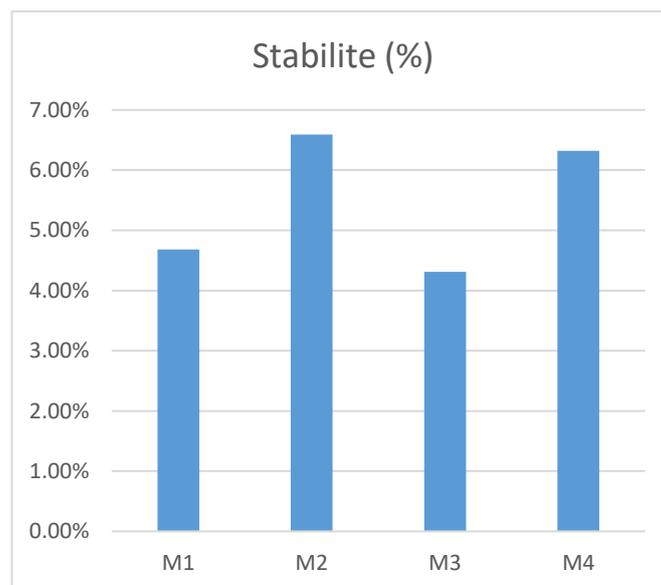


Figure 3.21 : Stabilité en fonction de 15% verre granulaire

D'après les résultats inscrits dans les tableaux : Les étalements des bétons autoplaçant testés sont supérieurs à 600 mm, le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 100 %, la laitance est inférieure de 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considérée comme satisfaisante.

Tous nos bétons ont présenté une bonne stabilité au tamis pas de ségrégation statique, validons ainsi, le rôle des additions pour limiter les risques de ségrégation

On remarque aussi que l'accroissement de la teneur en addition minérale n'influe pas sur la résistance à la ségrégation. Ce résultat s'explique du fait que les grains de l'addition minérale améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue.

Les résultats trouvés par l'essai de la boîte en L, présentés sur les figures nous indiquent que toutes les valeurs sont parfaites, on peut dire que ces bétons ont une bonne mobilité dans un milieu confiné et cela malgré les armatures qui font obstacle.

L'essai de stabilité aux tamis montre que on n'a pas une ségrégation malgré la grande fluidité ce qui est paradoxal à premier vue. Les tableaux montrent que les toutes les valeurs sont inférieures à 15%.

En fin on peut constater que le béton autoplaçants avec ajout respectent les critères d'étalement NF EN 12350 et les recommandations d'AFGC. Ces propriétés sont liées au rôle des ajouts et de superplastifiant qui a une action de défloculation et dispersion des grains de ciment qui sont directement liées à l'absorption de poly carboxylates à la surface des particules en évitant l'agglomération et libérant l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.

## **4.2. État durci**

### **• Évolutions de la résistance à la compression**

La résistance mécanique à la compression, c'est un facteur essentiel pour élaborer le comportement du béton à l'état durci, pour cela nous avons mesuré la résistance à la compression à 28 jours sur des éprouvettes cubiques 10×10×10 cm.

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette.



Figure 3.22 : Essai d'écrasement machine manuelle

Le tableau ci-après présente les Résultats d'essai de compression sur les bétons étudiés :

Tableau 16 : Les Résultats d'essai de compression

MELANGE	R (MPa)
M1 ( 0,7% S ; 0% déchet ; 400 kg Ciment )	25,3
M2 ( 2.5 % S ; 0 % déchet 400 kg Ciment )	25,7
M3 ( 0,7% S ; 5% poudre ; 400kg ciment )	24,8
M4 ( 0,7% S ; 15% poudre ; 400kg ciment )	25,5
M5 ( 2,5% S ; 5% poudre ; 400kg ciment )	25,4
M6 ( 2,5% S ; 15% poudre ; 400kg ciment )	25,6
M7 ( 0,7% S ; 5% granulats ; 400kg ciment )	25,5
M8 ( 0,7% S ; 15% granulats ; 400kg ciment )	25,7
M9 ( 2,5% S ; 5% granulats ; 400kg ciment )	25,4
M10 ( 2,5% S ; 15% granulats ; 400kg ciment )	25,7
M11 ( 0,7% S ; 0% déchet ; 350 kg Ciment )	25,2
M12 ( 2.5% S ; 0% déchet ; 350 kg Ciment )	25,5
M13 ( 0,7% S ; 5% poudre ; 350kg ciment )	25,4
M14 ( 0,7% S ; 15% poudre ; 350kg ciment )	25,7
M15 ( 2,5% S ; 5% poudre ; 350kg ciment )	25,6
M16 ( 2,5% S ; 15% poudre ; 350kg ciment )	25,9
M17 ( 0,7% S ; 5% granulats ; 350kg ciment )	25,4
M18 ( 0,7% S ; 15% granulats ; 350kg ciment )	25,7
M19 ( 2,5% S ; 5% granulats ; 350kg ciment )	25,5
M20 ( 2,5% S ; 15% granulats ; 350kg ciment )	25,7

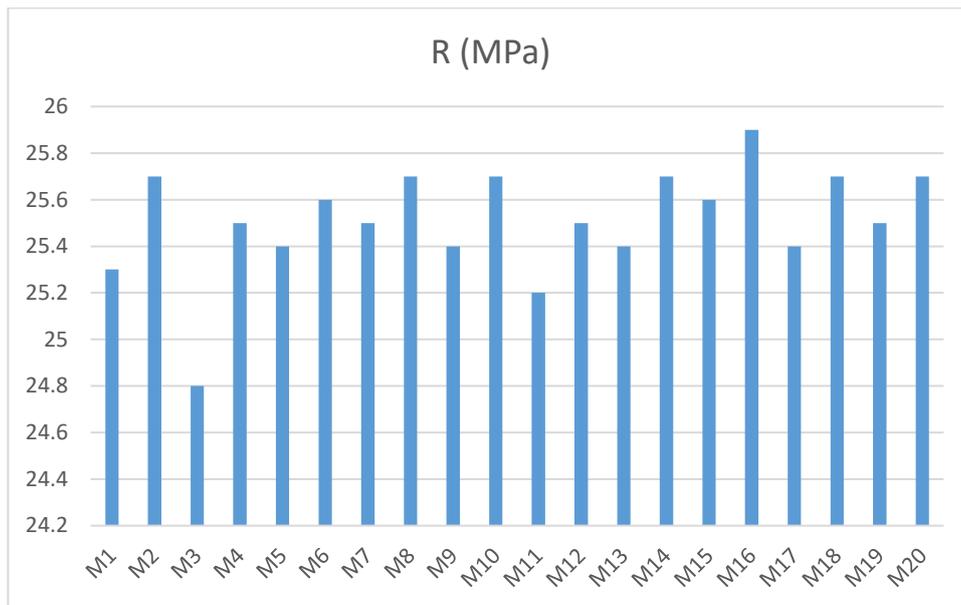


Figure 3.23 : Les Résultats d'essai de compression

- **Résultat de rupture :**

Les ruptures dans les éprouvettes se présentent comme suit :



Figure 3.24 : Les ruptures dans les éprouvettes

Un constat se porte sur la résistance à 28 jours des BAP, avec les matériaux utilisés (déchets de construction), nous avons pu formuler un béton autoplaçant qui présente une bonne résistance mécanique à la compression ( $> 25$  MPa).

On remarque que le M16 (ajout de poudre de verre) a la résistance la plus élevée par rapport à la compression.

Donc en résultats on a dit que les résistances élevées des BAP sont liées :

- Au volume de pâte important.
- A l'utilisation du superplastifiant "SIKAPLAST 40 PRO " dans les formulations des bétons autoplacants qui peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.
- A la présence d'une quantité importante des ajouts (poudre de verre ; verre granulaire) comme addition dans les BAP, ce qui peut également avoir une action positive sur leurs compacités (réduire le volume des vides entre les granulats) et par conséquent sur leurs résistances mécaniques.

## Conclusion

Cette partie expérimentale avait pour but de caractériser les bétons autoplaçants à l'état frais, à l'état durci. Dans ce contexte, plusieurs formulations de BAP ont été mises au point, à partir de matériaux identiques.

Par les résultats que l'on vient de présenter on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'introduction du superplastifiant, mais surtout des fines poudres de verre, du verre granulaire, a permis de formuler des bétons dont l'ouvrabilité est conforme à celle du BAP, tout en assurant le compromis entre une bonne fluidité par le superplastifiant et une bonne viscosité par les ajouts.
- ✓ Avec les matériaux utilisés, matériaux locaux (déchets de verre) la formulation du BAP présente une assez bonne résistance mécanique à la compression ( $\approx 26$ MPa) à 28 jours avec un ciment 42,5R et un rapport E/C = 0,4.
- ✓ Le superplastifiant utilisés dans cette étude distingue remarquablement par de meilleures performances mécaniques
- ✓ Les résultats obtenus pour les BAP sont tout à fait satisfaisants.

# Conclusion Générale

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude 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 objectifs de ce travail étaient donc d'éclaircir trois questions majeures. Le premier point traité était de rechercher une méthode qui permettrait la conception d'un béton autoplaçant dans le contexte Algérien. S'en est suivie l'évaluation l'influence des ajouts (poudre de verre, verre granulaire) sur le comportement des BAP à l'état frais. Enfin, les performances des BAP ; ainsi que leurs comportements à la rupture.

Le surdosage d'addition en déchets de verre et le surdosage de super-plastifiant il est influé directement sur la rhéologie du BAP et aussi sur les résistances mécaniques.

La formulation du béton autoplaçant est beaucoup plus complexe que la formulation de béton ordinaire (nombre de constituants  $\geq 6$ ) ; elle nécessite une attention particulière en ce qui concerne la méthode de formulation choisie, la nature du superplastifiant et le type de fillers utilisé (déchets de verre, superplastifiant SIKAPLAST 40 PRO),

La variation du dosage en superplastifiant peut contribuer à améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton autoplaçant.

Les effets des additions minérales sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des BAP sont de grande importance pour un plus large usage de ces matériaux. Diverses études suggèrent que l'addition des déchets de verre ou non au ciment affecte les propriétés du béton frais et durci.

Pour des études ultérieures sur le béton autoplaçant, nous recommandons de réaliser d'autres travaux de recherche sur :

- Le comportement du béton autoplaçant en utilisant d'autres types de fillers, avec l'utilisation d'un agent de viscosité,
- La variation du dosage en superplastifiant avec le pourcentage de fillers calcaires

- Le phénomène de retrait qui est, d'après quelques recherches, plus important que celui des bétons ordinaires.
- Le comportement des BAP aux différents traitements de surface.
- La résistance au feu.
- La pompabilité des BAP.
- Les résistances à l'usure et aux chocs.
- L'influence des traitements thermiques sur les caractéristiques et propriétés des BAP.

# Référence Bibliographique

- [1] T. SEDRAN, Les bétons autonivelants (BAN) synthèse bibliographique, Bulletin de liaison LCPC, mars 1995.
- [2] J-C. BRAQUENIER et J. DESNYTER, le béton autoplaçant ou autocompactant, 2000.
- [3] CSTC (centre de recherche), Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités, Belgique, 2004.
- [4] PH. TURCRY et A. LOUKILI, Différentes approches pour la formulation des BAP, revue française de génie civil volume 7 n°4, 2003.
- [5] PH. TURCRY, Retrait et fissuration des BAP : influence de la formulation, thèse de doctorat, l'école centrale de Nantes de l'université de Nantes, février 2004.
- [6] HOLCIM, Le béton autocompactant, recommandation éditées par HOLCIM, Suisse, novembre 2005
- [7] -Collection Technique CIMbéton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.
- [8] CSTC (centre de recherche), Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités, Belgique, 2004.
- [9] - Abib.Z, "formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", thèse de magister USTHB, 2004.
- [10] A. Tagnit Hamou, Les ajouts cimentaires et le développement durable, Université de Sherbrooke, Québec, CANADA.
- [12] - Boukni.B, "tenue au feu des bétons autoplaçants", thèse de magister UMC, 2007.
- [13] - Haddad.O, "Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge ", thèse de doctorat, France, 2007.
- [14] - Proust.E, "Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2002.
- [15] - Assié.S, "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004

- [16] Z. ABIB, Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants, thèse de magister USTHB, 2004.
- [17] J. BARON et J-P. OLLIVIER, Les bétons : bases et données pour leur formulation, Eyrolles, 1999.
- [18] Mladenka Saric-Coric, Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons, Université de Sherbrooke, 2002.
- [19]-Jin, "Properties of mortar for self-compacting concrete", Thèse de l'Université de Londres, 2002.
- [20]-Ouchi.M , Edamatsu.Y, "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete", In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Stockholm,1999.
- [21] –Loukili.A, Turcry.P, "Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self-compacting concrete", In proceeding of Conference ICPCM A new era of building, 18-20 February 2003.
- [22]- Ozawa.K, Maekawa.K, Okamura.H, "High performance concrete with high filling capacity", Proceedings of RILEM International Symposium on Admixtures for Concrete: Improvement of Properties, Barcelone, pp. 51-, 1990.
- [23]- Okamura.H, Maekawa.K, Ozawa.K, "High performance concrete", First ed. Gihouda Publishing Co, Tokyo, 1993.
- [24]-Okamura.H, Ozawa.K, "Mix design method for self-compacting concrete",Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, 1995.
- [25]- Okamura.H, Ouchi.M, "Self-compacting high performance concrete", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol1, 1998.
- [26]- Petersson.O, Billberg.P, Van.B.K, "A model for self-compacting concrete", Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse, 1996.
- [27]-Petersson.O, Billberg.P, "Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.

- [28]- Billberg.P, "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.
- [29]- Ozawa.K, Tangtermsirikul.S, Maekawa. K, "Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete", Proceedings of the 4th CANMET/AI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turquie, pp. 121-137, 1992.
- [30]-Van.B.K., "A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete", MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994.
- [31]- Tangtermsirikul.S, Van.B.K, "Blocking criteria for aggregates phase of Self compacting high performance concrete", Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69, 1995.
- [32]- Sedran.T, De Larrard.F, "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 321-332, 1999.
- [33]- De Larrard.F, Sedran.T, "Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 32, 11, pp. 1699-1704, 2002.
- [34] -Turcry.P, Loukili. A, "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques", Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.
- [35] - Proust.E, "Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2002.
- [36] - Assié.S, "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.
- [37]- Gibbs.J , Zhu.W, "Strength of hardend Self-Compacting concrete", Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete ,Stockholm, Suède, pp. 199-209, 1999.
- [38]- Pera.J, Husson.S, Guilhot.B, "Influence of finely ground limestone on cement hydration", Cement and Concrete Composites, 21, 2, pp. 99-105, 1999.
- [39] -De Larrard.F, "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000.

- [40] -Association Française de Génie Civil, "Bétons auto-plaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [41]- Walraven .J, "Structural aspects of selfcompacting concrete", Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, 1998. [42] - Projet Région "Amélioration des constructions par la maîtrise des BAP" Conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche "l'homme et sa région", 2005.
- [43]- Grünewald.S, Walraven.J.C, "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.
- [44]- Nielsson.I, Wallewick.O.H, "Rheological evaluation of some empiric methods – preliminary results", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.
- [45]-Utsi.S, Emborg.M, Carlswärd.J, "Relation between workability and rheological parameters", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 154-164, 2003.
- [46]-Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.
- [47] - CIMbéton, Le béton "Les techniques de mise en place du béton évoluent", CSTB magazine, N°109 Novembre 1997.
- [48] -Bertin.JF, "Recommandations de mise en œuvre des bétons autoplaçants et des autonivelants", Fédération Française du Bâtiment, SEBTP (Paris), 2003.

# Annexe A



## NOTICE PRODUIT

# SikaPlast®-40 Pro

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération

### INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

SikaPlast®-40 Pro est un superplastifiant haut réducteur d'eau, à base de polycarboxylates modifiés.

### DOMAINES D'APPLICATION

SikaPlast®-40 Pro est un superplastifiant/haut réducteur d'eau qui permet d'obtenir un long maintien de rhéologie. Il est donc parfaitement adapté au BPE et à l'utilisation sur chantier.

SikaPlast®-40 Pro permet la fabrication de :

- bétons de consistance S3 et S4,
- bétons à différents rapports E/C,
- bétons pompés.

Dans les bétons fluides, SikaPlast®-40 Pro améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule plus robuste vis-à-vis des variations de dosage en eau et des propriétés des constituants.

### DESCRIPTION DU PRODUIT

<b>Conditionnement</b>	Bidon 5 kg Bidon 10 kg Cubi 1100 kg
<b>Durée de Conservation</b>	12 mois dans son emballage d'origine intact
<b>Conditions de Stockage</b>	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et ré-homogénéisé
<b>Aspect / Couleur</b>	Liquide brun clair à foncé
<b>Densité</b>	1,055 ± 0,015
<b>Valeur pH</b>	4,5 ± 1,0
<b>Teneur Totale en Ions Chlorure</b>	≤ 0,1 %

### RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

<b>Dosage</b>	Plage de dosage : 0,7 à 2,5% du poids de liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
---------------	--

**Notice produit**  
SikaPlast®-40 Pro  
Octobre 2023, Version 01.03  
021301011000003541

#### Distribution

SikaPlast®-40 Pro est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage

---

### VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

### ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

### INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

SikaPlast®-40 Pro est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

### RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

### INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

#### Sika El Djazair SPA

08 route de Larbaa  
16111 Les Eucalyptus  
ALGERIE  
Tél.: 0 23 88 89 92 09  
Fax: 0 23 88 89 92 08  
dza.sika.com



#### Notice produit

SikaPlast®-40 Pro  
Octobre 2023, Version 01.03  
021301011000003541

SikaPlast-40Pro-fr-DZ-(10-2023)-1-3.pdf



# Annexe B

## Mode opératoire des essais :

### ● Granulométrie

#### - Equipement nécessaire :

- Série de tamis normalisés ;
- Balance ;
- Table vibrante ;
- Tare.

#### - Mode opératoire :

- Prélever l'échantillon qui va soumettre à l'essai.
- Prélever une masse de 4000g de matériau (sable).
- Peser chaque tamis à vide, soit  $m_i$  la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 5minutes.
- Peser chacun des tamis
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.
- A la fin de tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis a  $1g$  près, soit  $M_i$  : la masse de tamis (i) +le sable.
- Calculer la différence entre  $M_i$  et  $m_i$  (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel  $R_1$  de tamis 1).
- Reprendre ma même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis a  $R_1$ , soit  $R_2$  la masse de refus  $m$  de tamis 2( $R_2=R_1 +$  refus partiel sur tamis 2).
- Pour suivre la même opération avec la rente des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumules  $R_3 R_4 \dots R_n$  le tamisât est calculé par la relation :  $T=100 \cdot R_c$  ( $R$  : refus cumulé en %  $T$  : tamisât en%).

- **La masse volumique absolue**

- **Equipement nécessaire :**

- Eprouvette graduée
- Balance de précision 0,1g
- Tare.

- **Mode opératoire :**

- Peser une masse (M) bien déterminée de sable
- Remplir l'éprouvette par un volume d'eau (V1).
- Verser la prise d'essai de sable dans l'éprouvette.
- Définir le nouveau volume (V2).

La masse volumique est donc :  $M_v, abs = M / (V2 - V1)$

- **Essai d'étalement au cône d'Abrams**

- **Equipement 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 cotés 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 obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur.

- **Essai de stabilité au tamis**

- **Equipement nécessaire :**

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

- **Mode opératoire :**

- Echantillonnage.
- En laboratoire : Malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
- Temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement
- Remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion.
- Sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne : Prélever 10 L de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau.
- 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 tamis+fond sur la bascule.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15mn.
- 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 : hauteur de chute du béton de 50 cm  $\pm 5$  cm.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.
- Faire la tare.

- **Essai de la boîte en « L »**

- **Mode opératoire :**

La parie verticale de la boite 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 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 (fig.) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H2/H1$ .

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulat 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.