

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Hamzaoui Said

Ferhat Yassine

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : **Structure**

Thème :

Étude comparative entre deux types de bétons a base des granulats différents.

Mémoire examiné par :

Dr. Bouamra Youcef	MCB	UAMOB	Président
Dr. Kennouche Salim	MCB	UAMOB	Examinatrice
Dr. Mougari Brahim	MAA	UAMOB	Encadreur
Dr. Ait tahr.K	Professeur	UAMOB	Co- Promoteur

Année Universitaire 2020/2021.

Remerciements

*Avant tout. Louange à DIEU le tout puissant, le miséricordieux,
de*

*Nous avoir donné le courage, la force, la santé et la persistance
et de*

*Nous avoir permis de finaliser se travail dans de meilleurs
conditions.*

*Nous tenons à remercier notre promotrice Mr Mougari B qui a
accepté*

*M'encadrer, ses précieuses orientations, conseils, contrôles et
suivis, sa patience extrême, son assistance, et ses encouragements.*

*Nous remercions infiniment notre Co-promoteur Pr Ait Tahar K
pour ses aides, ses conseils.*

*Nos sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté
de juger ce travail. Nous tenons à exprimer nos sincères
remerciements aux techniciennes de laboratoires pédagogiques de
Génie civil pour tous les moments de travail passés au laboratoire et
pour leurs orientations et conseils précieux.*

*Un grand merci à tous ceux qui nous ont aidés sur le terrain à
recueillir des informations.*

Dédicaces

*En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce travail à tous
mes proches particulièrement :*

À ma chère et tendre mère qui était patiente et qui m'a tout donné:
Encouragement, soutiens et surtout amour. Que dieu le tout puissant la
protège ;

À mon cher père, source de sacrifice et de soutenance, à celui qui m'a
guidé vers la voie de la réussite et qui m'a donné le courage de
poursuivre mes études jusqu'à ce jour là ;

À mes chères

À mon cher frère

À toute ma grande famille et voisins

À tous mes amis

À mon binôme Yassine, qui a contribué à la réalisation de ce modeste
travail, merci pour ton sérieux.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de
ce travail.

Saïd

Dédicaces

*En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce travail à tous mes proches
particulièrement :*

*À ma chère et tendre mère qui était patiente et qui m'a tout donné:
Encouragement, soutiens et surtout amour. Que dieu le tout puissant la
protège ;*

*À mon cher père, source de sacrifice et de soutenance, à celui qui m'a guidé
vers la voie de la réussite et qui m'a donné le courage de poursuivre mes études
jusqu'à ce jour là ;*

*À mes chères sœurs et frères
À toute ma grande famille et voisins
À tous mes amis*

*À mon binôme Saïd, qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail, merci
pour ton sérieux.*

*À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de
ce travail.*

Yassine

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude comparative entre deux types de béton, qui sont le béton ordinaire et béton auto plaçant en utilisant des granulats ordinaires et des granulats légers dans les deux types. Une étude bibliographique a été menée sur les deux types de béton utilisés, leurs caractéristiques et leurs utilisations.

Cette étude vise à montrer le comportement mécanique du béton à partir d'essais de compression.

Les résultats obtenus montrent la possibilité de développer des nouveaux types de bétons légers à base des granulats d'argile expansée ayant une densité plus faible et une résistance mécanique acceptable.

Mots clés : Béton auto plaçant, granulats léger, l'argile expansée.

Abstract

The work presented in this thesis is a comparative study between two types of concrete, which are ordinary concrete and self placing concrete using ordinary aggregates and lightweight aggregates in both types. A bibliographical study was carried out on the two types of concrete used, their characteristics and their uses.

This study aims to show the mechanical behavior of concrete from compression tests.

The results obtained show the possibility of developing new types of lightweight concrete based on expanded clay aggregates with good thermal insulation, lower density and very acceptable mechanical strength.

Key words: self-placing concrete, lightweight aggregates, expanded clay.

الملخص

هذه المذكرة هي عبارة عن دراسة مقارنة بين نوعين من الخرسانة و التي هي الخرسانة المسلحة العادية و الخرسانة ذاتية الدمج عن طريق استخدام الركام العادي و الركام الخفيف في النوعين ، أجريت دراسة ببليوغرافية على النوعين المستخدمين من الخرسانة خصائصها و استخداماتها .

تهدف هذه الدراسة إلى اكتشاف السلوك الميكانيكي للخرسانة عن طريق اختبار الانضغاط .

النتائج التي تم الحصول عليها تظهر إمكانية تطوير أنواع خرسانة جديدة خفيفة الوزن تعتمد على مجاميع طينية ممتدة تتميز بعزل حراري جيد و كثافة أصغر و مقاومة ميكانيكية مقبولة للغاية .

كلمات مفتاحية: الخرسانة ذاتية الدمج ، الركام الخفيف ، مجاميع طينية ممتدة .

Sommaire

INTRODUCTIONS GENERALE.....	1
CHAPITRE I : LE BETON ORDINAIRE	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition	3
I.3. Constituants du béton.....	3
I.3.1. Ciment	3
I.3.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des ciments portlands.....	5
I.3.2 Granulats	7
I.3.2.1 Les types des granulats	8
I.3.2.2 Domaines d'utilisation.....	10
I.3.3 Eau.....	10
I.3.4 Adjuvants	10
I.4. Conclusion	11
CHAPITRE II : LE BETON AUTO PLAÇANT	
II.1. Introduction	12
II.2. Définition du béton auto plaçant	12
II.3. Domaine d'utilisation des BAP	12
II.4. Les critères de composition des BAP	14
II.4.1 Un volume de pâte important.....	14
II.4.2. Une quantité de fines (<80 µm) importante.....	15
II.4.3 L'utilisation des super plastifiants.....	15
II.4.4 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité).....	16
II.4.5 Un faible volume de gravillon	17
II.5. Constituants d'un BAP	17
II.5.1 Les liants et les granulats	17
II.5.1.1 Le ciment.....	17
II.5.1.2. LES AJOUTS MINERAUX.....	17
II.5.1.3 Les granulats	20
II.5.1.4 Les adjuvants.....	20
II.6. Caractérisation d'un béton auto plaçant	21
II.6.1 Propriétés des BAP à l'état frais	21

II.6.1.1 Le remplissage.....	21
II.6.1.2 La résistance à la ségrégation.....	21
II.6.1.3 La capacité de passage	22
II.6.2. Caractérisation des BAP	23
II.6.2.1 Essais de fluidité.....	23
II.6.2.2. Ségrégation dynamique	24
II.6.2.3 Essais de ségrégation statique	25
II.6.2.4 Ressuage	26
II.7. Les approches de formulation.....	27
II.7.1. Méthode de formulation pratique des BAP	27
II.7.2. Formulations des BAP existants dans la bibliographie.....	28
II.7.2.1. Approche japonaise	28
II.7.2.2. Approche CBI (suédoise).....	28
II.7.2.3. Approche LCPC	29
II.8. Propriétés des BAP à l'état durci.....	30
II.8.1. Propriétés mécaniques	31
II.8.1.1. Résistance mécanique.....	31
II.8.1.2. Module d'élasticité statique (en compression).....	31
II.8.1.3. Retrait au jeune âge (0-24 heures).....	32
II.8.1.4. Retrait à l'état durci.....	32
II.8.1.5. Déformations et fluage	32
Propriétés physico-chimiques.....	32
II.9. Fabrication, transport et mise en place des BAP	33
II.9.1. Fabrication des BAP	33
II.9.2. Transport des BAP	33
II.9.3. Mise en place des BAP	33
II.10. Conclusion	34

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

III.1. Introduction	35
III.2. Matériaux utilisés	35
III.2.1. Ciment	35
III.2.2. Granulats.....	35

III.2.3. L'eau de gâchage	36
III.2.4. Adjuvant (Super plastifiant)	36
III.2.5. Ajout minéral	37
III.3. Caractérisation des matériaux	37
III.4. Elaboration des bétons	40
III.4.1. Formulation des bétons ordinaire	40
III.4.1.1 Dosage du constituant du béton ordinaire lourd en kg/m^3	42
III.4.1.2 Dosage du constituant du béton ordinaire léger en kg/m^3	42
III.4.2 Formulation des bétons auto plaçant.....	43
III.4.2.1 Dosage du constituant du béton auto plaçant lourd en kg/m^3	44
III.4.2.1 Dosage du constituant du béton auto plaçant lourd en kg/m^3	45
III.5. ESSAIS SUR BETON	45
III.5.1. INTRODUCTION	45
III.5.2. Confection des bétons.....	47
III.5.2.1. Préparation de la gâchée	47
III.5.2.2. Conservation des éprouvettes.....	47
III.5.3. Essais sur bétons	48
III.5.3.1 Essais sur béton frais	48
III.5.3.1.1 Essai d'étalement (BAP) ou d'affaissement (BO)	48
III.5.3.1.2 Essai de la boîte en « L »	49
III.5.3.2. Essais à l'état durci	51
III.5.3.2.1. Essai de compression uniaxiale (NF P 18-406)	51
III.5.3.2.2 Résultats de la résistance à la compression des bétons.....	52
III.5.3.2.1 Interprétations des résultats.....	57
CONCLUSION GENERALE.....	58

Liste des figures

CHAPITRE I : LE BETON ORDINAIRE

Figure I.1. Composition d'un béton.	3
Figure I. 2. Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport Eau/ciment.	5
Figure I. 3. Variation de la résistance à la compression du béton confectionné à partir d'argile expansées en fonction de sa masse volumique (dans des conditions normales de conservation : 20°C, 65% d'humidité relative).	9
Figure I.4. analyse granulométrique.	10

CHAPITRE II : LE BETON AUTO PLACANT

Figure II. 1. Le pont Akashi Kaikyo.	13
Figure II. 2: La tour Landmark Tower	14
Figure II. 3. Dispersion des granulats par excès de pâte	14
Figure II. 4. Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.	15
Figure II. 6. Interaction entre l'eau et les polysaccharides.	16
Figure II. 5. Etalement et viscosité en fonction du dosage en super plastifiant	16
Figure II. 7. Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton.	17
Figure II. 8. . Composition s'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP) Aspect à l'état frais d'un (BO) et d'un (BAP)	20
Figure II. 9. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers.	22
Figure II. 10. Essai d'étalement.	24
Figure II. 11. Boite en L.	25
Figure II. 12. Essai de la stabilité au tamis.	26
Figure II. 13: Essai de ressuage à l'aéromètre.	27
Figure II. 14. Essai de la stabilité au tamis.	27
Figure II. 15. Résistance en compression de différents mélanges.	30
Figure II. 16. Evolution de la r résistance m mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant.	31

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

Figure III. 1. Le ciment utilise.	35
Figure III. 2. Les granulats légers utilisés (l'argile expansée).	36
Figure III. 3. Le super plastifiant SIKA viscosité – 625.	36
Figure III. 4. la fumée de cilice Condensil S-95 DP SIKA.	37
Figure III. 5. Abaque permettant la détermination du dosage en ciment.	42

Figure III. 6. Essai 'affaissement du béton ordinaire lourd.....	48
Figure III. 7. Essai d'étalement.....	49
Figure III. 8. : Essai de la boîte en L.....	50
Figure III. 9. Eprouvettes d'essai de compression.....	51
Figure III. 10. : Presse utilisée pour la compression.....	52
Figure III. 11. Résistance a' la compression a' 7J (MPa) de béton ordinaire lourd.....	53
Figure III. 12. Résistance a' la compression a' 7J (MPa) de béton ordinaire léger.....	53
Figure III. 13. Résistance a' la compression a' 7J (MPa) de béton auto plaçant lourd.....	53
Figure III. 14. . Résistance a' la compression a'7J (MPa) de béton auto plaçant léger.....	54
Figure III. 15. Résistance a' la compression a'7J (Mpa) de béton.....	54
Figure III. 16.mode de rupture du béton,épreuve (15x15) cm.....	55
Figure III. 17 .Résistance a' la compression a'14J (Mpa) de béton.....	56

Liste des tableaux

CHAPITRE I : LE BETON ORDINAIRE

Tableau I. 1.Résistances mécaniques des ciments courants.	4
--	---

CHAPITRE II :LE BETON AUTO PLACANT

Tableau II. 1: Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada.	18
Tableau II. 2. Classe d'étalement.....	21
Tableau II. 3. Propriétés d'ouvrabilité des BAP.....	23

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau III. 1.Quelques caractéristiques SIKA viscosité – 625.....	37
Tableau III. 2.Quelques caractéristiques de la fumée de silice.....	37
Tableau III. 3. Masse volumique apparente et absolue des granulats classique.....	38
Tableau III. 4. Masse volumique apparente et absolue des granulats légers.....	38
Tableau III. 5. Résultats de l'absorption des granulats classiques.....	39
Tableau III. 6. Module de finesse de sable (classique).....	39
Tableau III. 7. Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	41
Tableau III. 8. Dosage du constituant du béton ordinaire lourd en kg/m ³	42
Tableau III. 9. Le taux de dosage.....	42
Tableau III. 10. Dosage des constituants du béton léger.....	42
Tableau III. 11. Dosage du constituant du béton auto plaçant lourd en kg/m ³	44
Tableau III. 12. Dosage du constituant du béton auto plaçant léger en kg/m ³	45
Tableau III. 13. Composition des différents bétons pour 1m ³	45
Tableau III. 14. Résultats de l'essai au cône d'Abrams.....	49
Tableau III. 15. Résultats de la boîte en « L ».	50

Tableau III. 16. Tableau récapitulatif des résultats d'essais à l'état frais de béton.....	50
Tableau III. 17. Résistances à la compression des bétons a'7J (15×15×15) cm ³	52
Tableau III. 18. . Résistances à la compression des bétons a'14J (15×15×15) cm ³	56

Introduction générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. La simplicité de sa fabrication et de son installation, son faible coût, ses performances mécaniques et sa durabilité garanties permettent de réaliser en toute légalité les projets les plus divers, notamment les immeubles, les immeubles à appartements, les ponts, les routes, les barrages, les centrales thermiques et nucléaires Attendre.

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons auto plaçant (BAP).

Aujourd'hui, le développement des matériaux composites de densité faible et de caractéristiques spécifiques intéressantes est très recherché par les auteurs et spécialistes du génie civil. Les matériaux composites présentent des propriétés mécaniques spécifiques à leur emploi. Beaucoup de procédés de développement de nouveaux matériaux innovants sont proposés par des chercheurs pour répondre aux exigences sécuritaires, et l'amélioration des bâtiments.

L'objectif principal, notamment en génie civil est d'optimiser les sollicitations au niveau des éléments structuraux, principalement la diminution de la densité des matériaux utilisés, qui réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments, en utilisant des matériaux de construction avec des performances thermique et acoustique, tout en réduisant, les quantités des matériaux utilisés, ainsi le coût global du bâtiment, et les dimensions des sections des éléments structuraux. A cet effet, l'utilisation des granulats minéraux légers est une solution des performances techniques et confort. L'utilisation généralisée de granulats légers dans la construction a surtout commencé par la découverte de l'argile expansée ayant une résistance mécanique et isolation thermique et phonique suffisante et une qualité adaptée pour une utilisation dans des applications structurelles en béton et mortier.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons mené une étude comparative entre béton ordinaire et béton auto plaçant, en utilisant deux types de granulats .

Chapitre I

Le Béton Ordinaire

I.1. Introduction

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie et c'est l'un des matériaux de préfabriqués, éléments de structure, etc. ; par exemple : tuyaux, blocs, solives, pavés, Sols, cloisons, escaliers...utilisation pour les constructions les plus utilisés au monde. En effet, la simplicité, la durabilité et l'économie de sa fabrication et de son installation, ainsi que ses propriétés mécaniques garanties, légalisent son e béton est utilisé dans tous les types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éléments décoratifs éventuels... Il permet également la réalisation de produits tâches les plus diverses.

I.2. Définition

Le béton est un matériau composite multiphasique hétérogène composé d'un mélange intime de granulat, de sable et de pâte (ciment, eau). Le coulis de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton [1]. Chaque composant joue un rôle clair : liant hydraulique pour le coulis de ciment, filler pour réduire le changement de volume (retrait), et une source de résistance pour les granulats.

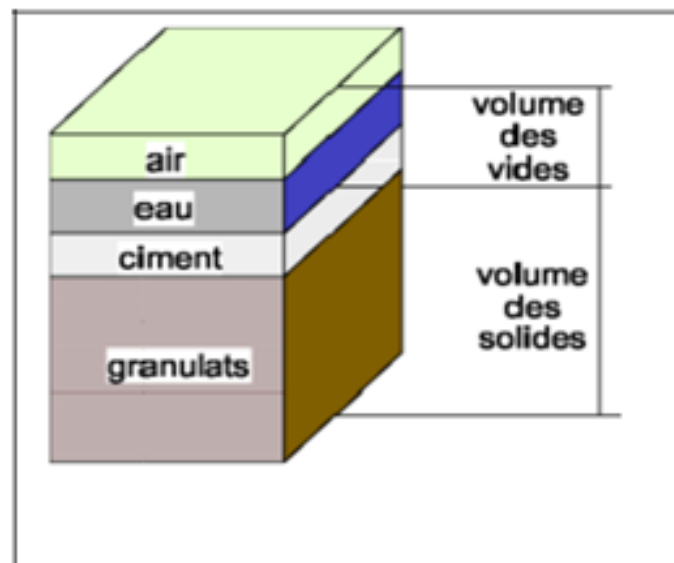


Figure I.1: Composition d'un béton.

I.3. Constituants du béton

I.3.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau une pâte faisant prise qui durci progressivement Grâce à

ses caractéristiques, cet élément permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Les principaux constituants du ciment portland sont :

- Le silicate tricalcique (C₃S)..... 3CaOSiO₂
- Le silicate bicalcique (C₂S) 2CaOSiO₂
- L'aluminate tricalcique (C₃A)..... 3CaOAl₂O₃
- Le ferroaluminate tetracalcique (C₄AF) 4CaOAl₂O₃Fe₂O₃

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours.

La norme EN 196-1 spécifie une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Tableau I. 1. Résistances mécaniques des ciments courants.

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Les classes " R ", rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication....etc.

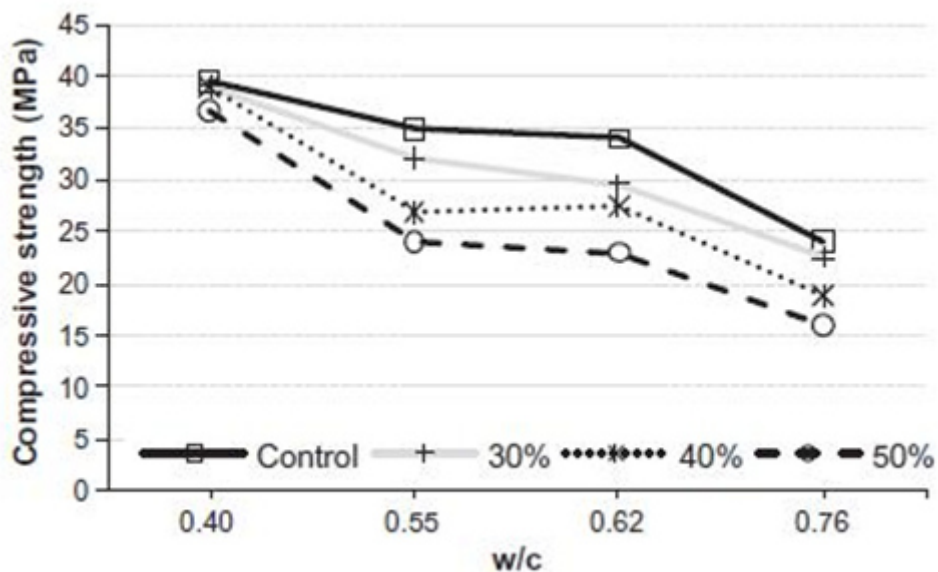


Figure I. 2: Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport Eau/ciment.

I.3.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des ciments portlands

1) Hydratation du ciment

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, des réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus au moins enchevêtrées produisant la prise.

La réaction d'hydratation peut se développer en 4 périodes principales :

a) Période initiale

Au cours de la quelle le silicate tricalcique se dissout superficiellement pour former un monosilicate de calcium hydraté et l'étrangéité.

b) Période dormante

Au cours de la quelle la pâte reste fluide, les réactions précédentes se poursuivent moins rapidement pendant une durée de 2 à 3 heures.

c) Période de prise

Au cours de la quelle la pâte acquiert une certaine consistance due à l'interpénétration des cristaux.

Le phénomène de prise est lié à de nombreux paramètres qui sont les suivantes :

- **Le type de ciment** : certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance ;
- **La finesse de mouture** : le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande.

- **La température ambiante** : la prise étant stoppée à 0°C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30°C.
- **L'excès d'eau de gâchage** : qui agit alors comme retardateur de prise

La norme NF P 15-301 spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

1 h : 30 mn pour les ciments des classes 32.5 et 32.5R.

1 h pour les ciments des classes 42.5 - 42.5R - 52.5 - 52.5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h : 30mn à 3 h : 30mn pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'étendant pour une température ambiante de 20°C.

d) Période de durcissement

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement qui se développe environ 8 heures après le début de l'hydratation et qui se poursuit pendant des mois voire des années avec une vitesse de plus en plus lente au cours desquelles les résistances mécaniques continuent à croître.

Il faut noter que la quantité d'eau nécessaire pour un gâchage correct du béton est supérieure à celle nécessaire aux seules réactions chimiques, car il faut distinguer :

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés, son pourcentage étant en général de l'ordre de 20 à 25% du poids de ciment ;
- L'eau adsorbée aux surfaces des granulats,
- L'eau libre dans les fins réseaux capillaires, qui s'élimine plus ou moins par séchage et qui est nécessaire pour obtenir la plasticité et la maniabilité indispensables au gâchage et à la mise en place des bétons.

2) Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C₃A que l'on cherchera à utiliser par temps froid ou en préfabrication, alors qu'on aura intérêt à les éviter par temps chaud, cette chaleur à 12 heures, est de l'ordre de 300 j/g pour certains CPA-CEM I.

3) Finesse de mouture

La finesse de mouture, également appelée surface Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface spécifique ou la surface développée d'une masse de 1 g de ciment, elle est d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm^2/g .

Plus la finesse est grande plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration sont accrus.

4) Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de $4 \times 4 \text{ cm}^2$

Conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. La norme NF P 15-433 impose les valeurs limites, à 28 jours, de

-800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les ciments portlands CPA-CEM I et CPJ-CEM II de classe 32.5 ;

-1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour des types de ciment identiques mais de classes 32.5R, 42.5 et 42.5R.

5) Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre.

Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

La stabilité se détermine par l'essai Le Chatelier, qui consiste à mesurer l'écartement de deux aiguilles solidaires d'un moule rempli par la pâte de ciment à tester, et conservé dans l'eau bouillante. La valeur de l'expansion mesurée doit être inférieure à 10 mm pour tous les types de ciments courants.

Le pourcentage maximal de magnésie est limité ; sa valeur spécifiée par la norme, doit être au plus égale à 5% pour les CPA-CEM I ainsi que pour les clinkers des ciments courants.

6) Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ 10% de celles constatées dans l'air.

I.3.2 Granulats

On définit les granulats comme l'ensemble des grains inerte compris entre 0 et 40 mm (Sable, graviers, cailloux) dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

On distingue les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivière, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent.

La courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passant dans des tamis de dimensions normalisées.

I.3.2.1 Les types des granulats

Naturels : lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives (granulat d'origine minérale) et n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (concassage, criblage...).

Artificiels : lorsqu'ils résultent d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres, de roches ou de minerais (origine minérale), exemple : laitiers de hauts fourneaux, pouzzolanes, mâchefers, argile expansée, schiste expansé, verre expansé, cendres volantes, scories d'aciérie, bauxite calcinée, fumée de silice ...).

Recyclés : lorsqu'ils sont obtenus par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction (granulats recyclés à partir de démolition de bâtiment, d'ouvrages ou de chaussée...).

Courants : lorsque leur masse volumique réelle $MVR \geq 2t/m^3$ (2000kg/m³).

Légers : lorsque leur masse volumique réelle $MVR < 2t/m^3$.

- **Les types des granulats légers**

Laitiers de hauts fourneaux

C'est un coproduit issu de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau, où il correspond à la gangue stérile du minerai de fer à laquelle s'ajoutent les cendres du coke. Les laitiers sont appréciés comme remblai ou comme matière première dans la fabrication des ciments.

La pouzzolane

C'est une scorie (projections) volcaniques basaltique à texture alvéolaire, en raison de sa très forte porosité, elle est à la base de la fabrication de certains ciments à prise lente, utilisés notamment dans la constitution du béton des barrages de type BCR (Béton Compacté au Rouleau). Elle est considérée comme granulat léger entrant dans la confection des bétons

de construction. Dans les travaux publics, sa faible densité (0,85 t/m³) lui permet de mettre en œuvre des remblais allégés, elle est utilisée aussi en remblaiement sur ouvrage souterrain.

Mâchefers

Sont des déchets industriels et urbains des usines d'incinération. Le mâchefer est souvent utilisé en travaux publics comme remblai de tranchée ou sous-couche de chaussée en substitution de matériaux plus nobles, tels que le sable. Utilisé aussi comme liant hydraulique (effet de prise comparable à celui du ciment).

Argile expansée

L'argile expansée, également connue sous les termes d'argile cuite de galets, hydrocorns, latérite, ou plus simplement « billes d'argile », est un matériau granulaire léger constitué de petits globes de brûlé et bouffi d'argile. Le schiste expansé est une variante d'argile expansée obtenue par cuisson de schistes appropriés, utilisée dans la construction. Les argiles expansées ont une structure alvéolaire et sont obtenus par expansion à chaud d'un minéral argileux. Ils sont disponibles en différents formats tels que 0/3, 2/4, 4/8, 8/16 ou 10/20 (de 10 à 20 mm de diamètre). La densité standard de vrac sec de granulats légers d'argile expansée est de 250 à 480 kg/m³. L'argile expansé est utilisé dans la construction (bétons et mortiers : réfractaire, allégeant, isolant thermique), les infrastructures et le traitement de l'eau.

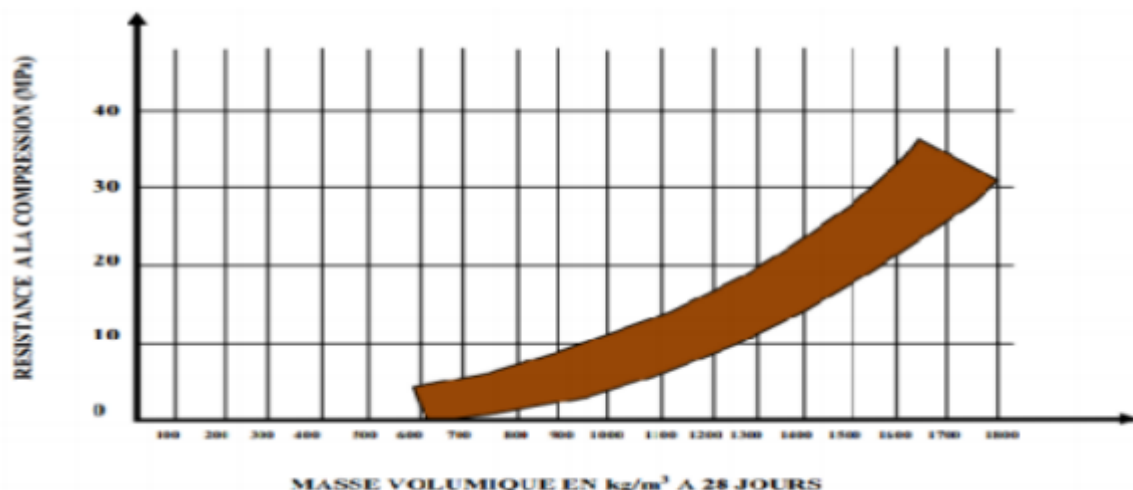


Figure I. 3. Variation de la résistance à la compression du béton confectionné à partir d'argile expansées en fonction de sa masse volumique (dans des conditions normales de conservation : 20°C, 65% d'humidité relative).

I.3.2.2 Domaines d'utilisation

Les granulats sont destinés à la confection des bétons et mortiers, des couches composant les chaussées (couche de fondation, de base et déroulement) et les assises de voies ferrées (ballasts), utilisés aussi en enrochement et comme matériau drainant.

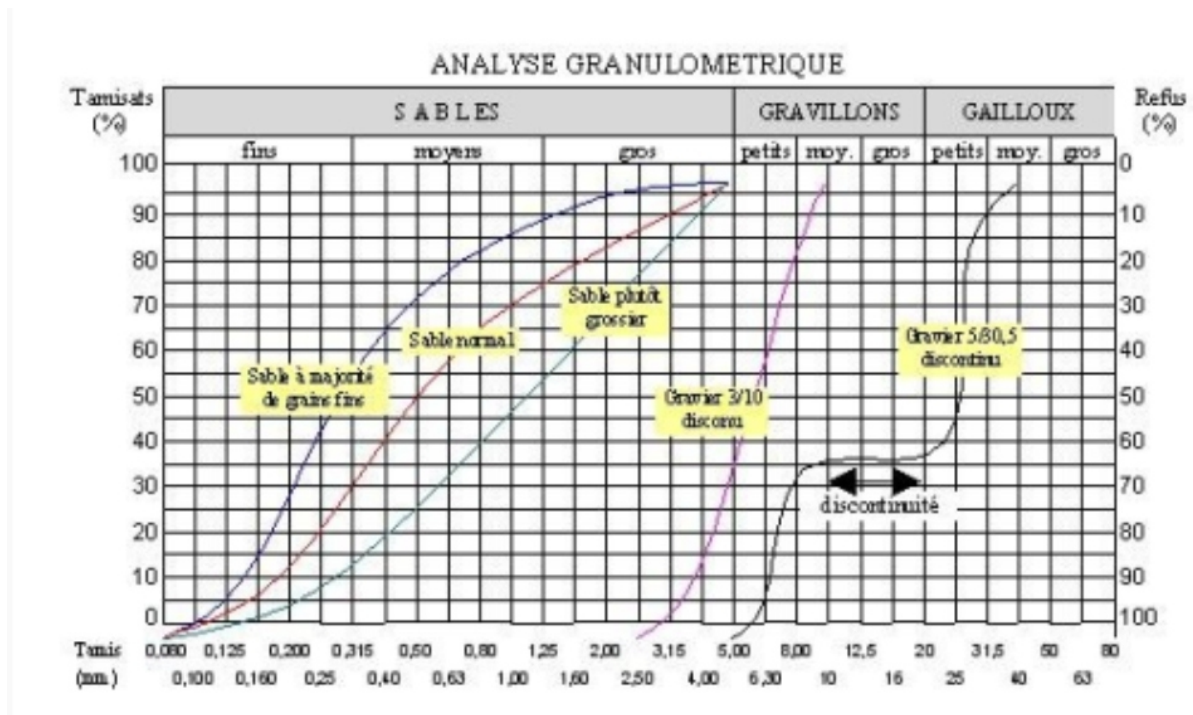


Figure I.4. analyse granulométrique.

I.3.3 Eau

L'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir de matière en suspension au delà des tolérances réglementaires suivantes : [1]

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance.
- 5 g/l pour les bétons à faible résistance.
- 15 g/l pour les bétons à hautes résistances.
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

I.3.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités, afin d'en améliorer certaines propriétés, les principaux adjuvants sont :

- **Les retardateurs de prise** ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de grandes distances, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi utilisés pour éviter toute discontinuité lors de reprise de bétonnage.
- **Les accélérateurs de prise** : ils trouvent leur utilisation dans la réalisation de scellement ou d'étanchement.
- **Les accélérateurs de durcissement** : ils permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques à jeune âge afin de décoffrer rapidement et augmenter par conséquent la cadence de travail, en particulier en temps froid.
- **Les entraîneurs d'air** : ils favorisent la formation de microbulles d'air (agrégats fictifs) de façon homogène afin d'augmenter la résistance du béton aux cycles gel-dégel.
- **Les hydrofuges de masse** : ils permettent d'étanchéifier le béton, en colmatant les pores capillaires, ils trouvent leur utilisation dans la réalisation des réservoirs d'eau, piscines, bâche à eau.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous discutons des composants et des propriétés du béton ordinaire, et mise en valeur les différents granulats légers d'origine minérale et la présentation de leurs propriétés spécifiques, donc nous allons comparer avec les granulats minéraux classiques.

Chapitre II

Le Béton auto plaçant

II.1. 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 le moyen d'obtenir ces caractéristiques. Devant la complexité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armatures, les formulations de bétons ont dû s'adapter. Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est devenue plus nécessaire. Cette hyper fluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants « super plastifiants ». Le béton auto plaçant était alors né.

Le JAPON a été dans les années 80 le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique et qui s'est progressivement répandue à travers le reste du monde, de nombreux termes définissent ces bétons :

- Béton auto-compactant (BAC).
- Self-compacting concrete (SCC, en Anglais).
- Béton hyper fluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton auto plaçant (BAP).

II.2. Définition du béton auto plaçant

Par béton auto plaçant (BAP), on désigne un béton très fluide, très déformable, stable et mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuant par le seul effet gravitaire). Il confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant au béton classique mis en œuvre par vibration, il garantit à la structure la résistance et la durabilité [2]. Par définition, les BAN (Bétons Auto-Nivelant) constituent une famille de BAP correspondant aux applications horizontales (dallage, planché...).

II.3. Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [3]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en

BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

- densités de ferrailage importantes.
 - formes et géométries complexes : voiles, courbes, ...
 - voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ...
 - voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
 - exigences architecturales et qualité de parement particulière.
- A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :

Le pont Akashi Kaikyo (Figure II.1), le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 de béton auto plaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994).



Figure II. 1.Le pont Akashi Kaikyo.

La tour Landmark Tower (Figure II.2), où un béton auto plaçant 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 II. 2:La tour Landmark Tower

II.4. Les critères de composition des BAP

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton auto plaçant doit avoir certaines caractéristiques [4], soit :

II.4.1 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'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé (Figure II.3).

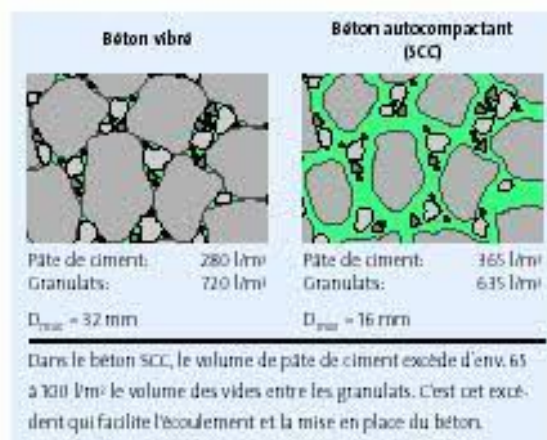


Figure II. 3. Dispersion des granulats par excès de pâte

II.4.2. Une quantité de fines (<math><80\ \mu\text{m}</math>) 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 $500\ \text{kg/m}^3$) 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.).

II.4.3 L'utilisation des super plastifiants

Les super plastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloquant, 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.

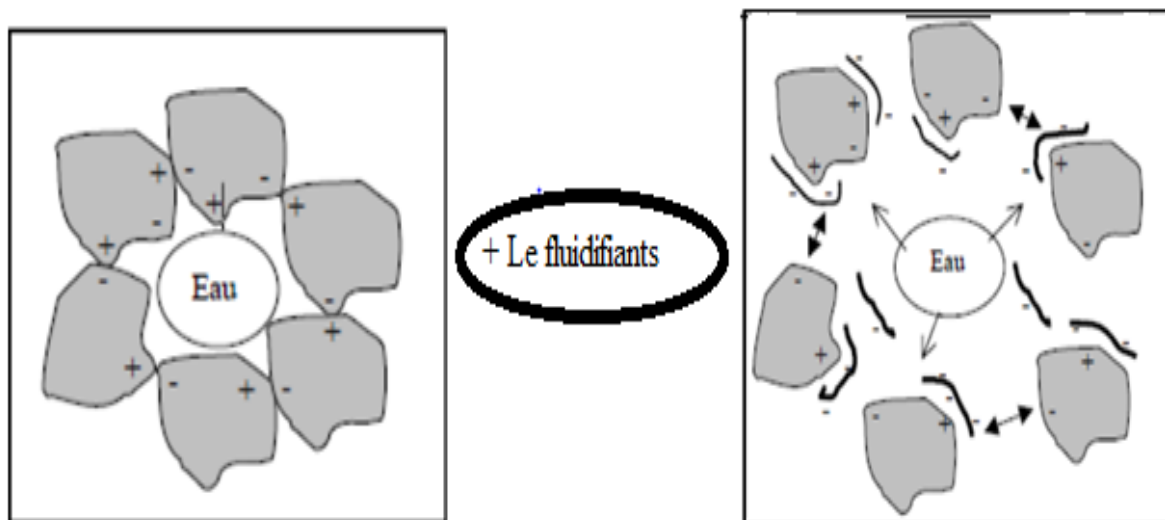


Figure II. 4. Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.

La Figure II.4 illustre l'effet d'introduction d'un super plastifiant sur l'ouvrabilité du béton ; plus le dosage en super plastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en super plastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

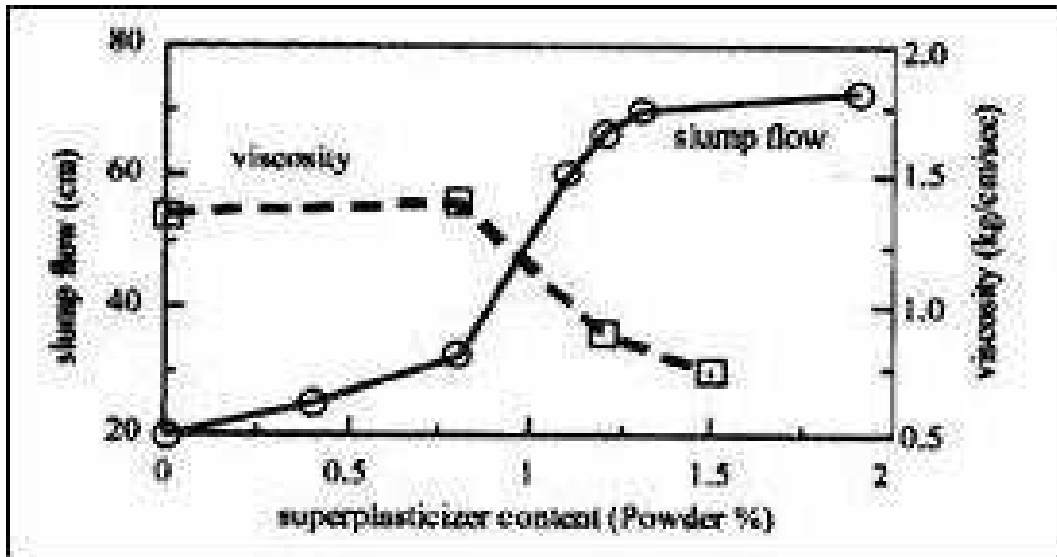


Figure II. 5. Etalement et viscosité en fonction du dosage en super plastifiant .

II.4.4 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)

L'ajout d'un super plastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.

L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

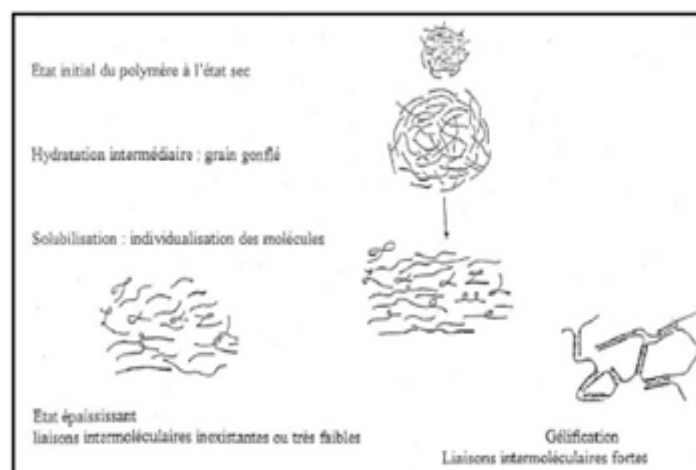


Figure II. 6. Interaction entre l'eau et les polysaccharides.

II.4.5 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.

II.5. Constituants d'un BAP

II.5.1 Les liants et les granulats

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non.

II.5.1.1 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 CPJ CEM I 52,5 ou 42.5.

II.5.1.2. LES AJOUTS MINÉRAUX

Ce sont des particules de très faibles dimensions qui sont incorporées dans le béton pour améliorer ses caractéristiques physico-chimiques. Exemple : Fumée de silice, Cendres volantes, Laitiers de haut fourneau, Pouzzolanes et Fillers calcaires.

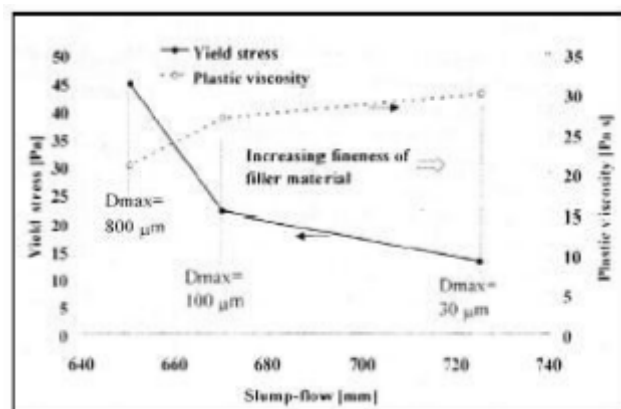


Figure II. 7. Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton.

II.5.1.2.1. Fumée de silice

L'idée de l'utilisation des fumées de silice dans le béton est née dans le but de minimiser la pollution de l'environnement.

Afin de limiter les déchets polluants de l'industrie du silicium et de ses alliages, les pays scandinaves ont utilisé les fumées de silice comme un ajout dans le béton. Cependant, le développement de la technologie des adjuvants et surtout les super plastifiants haut réducteurs d'eau a facilité l'incorporation des fumées de silice, et à contribuer dans l'amélioration des caractéristiques du béton que ce soit à l'état frais ou à l'état durci.

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferro-alliages contenant du silicium comme le (FeSi, CaSi). Les fumées de silice proviennent de la condensation de vapeurs de SiO qui sont produites dans un four à arc électrique à une température de 2000°C où le quartz est réduit à l'état de silicium. Dès que ces vapeurs de SiO entrent en contact avec l'air dans les parties les plus froides du four, elles s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice.

II.5.1.2.2. Propriétés physico-chimiques des fumées de silice

Les fumées de silice ont une structure vitreuse, ayant un diamètre moyen de l'ordre de 0.1 µm, elles sont donc 100 fois plus fines que les grains de ciment et contiennent en général plus de 90% de silice.

Les fumées de silices ont une composition chimique très constante, le laboratoire de la société canadienne SKW qui produit des fumées de silice provenant de la fabrication de silicium ou de ferro-silicium a publié les résultats de la compilation de l'analyse chimique de 32 échantillons de fumées de silice prélevés quotidiennement.

Tableau II. 1: Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada.

Teneur (%)	Moyenne	Écart-type	Valeur la plus élevée	Valeur la plus faible
SiO ₂	92.1	1.3	94.9	89.1
Al ₂ O ₃	0.25	0.12	0.70	0.16
Fe ₂ O ₃	0.79	0.70	3.1	0.22
Na ₂ O	0.17	0.04	0.11	1.1
K ₂ O	0.96	0.22	1.44	0.56
SO ₃	0.36	0.1	0.57	0.16
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	93.1	1.44	95.7	90.3

II.5.1.2.3. Mécanisme d'action de la fumée de silice dans le béton

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, telles que la très grande finesse et la teneur en silice (plus de 92%) ainsi que sa structure vitreuse, les fumées de silice peuvent agir selon trois mécanismes d'action :

a) Effet pouzzolanique

Grâce à leurs finesses, les fumées de silice réagissent très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment pour former du C-S-H, et on peut observer des gains de résistance en compression à jeune âge (7 jours) contrairement à la pouzzolane naturelle ou artificielle où il faut attendre plus de 28 jours pour observer des gains de résistance en compression.

b) Effet physico-chimique

L'utilisation de la fumée de silice a pour effet de rendre le béton plus compact et imperméable. Grâce à sa réaction pouzzolanique avec la chaux dégagée par le clinker lors de l'hydratation du ciment, on observe après 7 jours que les pores ayant un diamètre de $0.1 \mu\text{m}$ commencent à se boucher en parallèle avec la diminution du diamètre des pores les plus fins, ce phénomène se poursuit au fur et à mesure que le béton vieillit.

c) Effet physique

Les particules de fumée de silice étant vitreuse et fines, elles permettent de remplir les pores les plus fins de l'empilement des grains de ciment.

D'après P-C.AITCIN, la fumée de silice peut plastifier les bétons à faible rapport E/L, en chassant l'eau qui se trouve entre les particules de ciment. [2]

L'utilisation de la fumée de silice exige inévitablement l'introduction d'un super plastifiant lors du malaxage du béton pour défloculer les grains de ciment et les particules de fumée de silice d'une part, et garder la même maniabilité que les bétons ordinaires d'autre part, car l'utilisation de la fumée de silice a pour effet d'augmenter la demande en eau, à cause de l'ancrage de ses particules entre elles.

II.5.1.2.4. Influence des fumées de silice sur les propriétés des bétons

Par leurs caractéristiques morphologiques et minéralogiques, les fumées de silice peuvent influencer sur les propriétés des bétons à l'état frais ou à l'état durci :

- **À l'état frais**

L'utilisation des fumées de silice, permet :

D'augmenter le volume des particules fines dans le béton, ce qui permet de réduire les risques de ségrégation et d'éliminer pratiquement le ressuage, dans le cas des bétons auto plaçant ;

De faciliter les conditions de transport et de mise en place du béton par pompage.

- **À l'état durci**

Augmenter considérablement la résistance en compression et l'imperméabilité du béton (Les bétons contenant 10% de fumée de silice deviennent pratiquement Imperméables).

Remplacer une certaine quantité de ciment et obtenir la même résistance compression à 28 jours (d'après P.C.AITCIN, avec un dosage de 7 à 12% de la masse de ciment, 1 kg de fumée de silice peut remplacer de 3 à 4 kg de ciment). [2]

Réduire considérablement la quantité de chaleur qui se développe dans un béton, grâce à la réduction du dosage en ciment.

II.5.1.3 Les granulats

- Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés.
- Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés [8], [9].
- Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm.
- La proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées.
- Le rapport G/S est de l'ordre 1.

II.5.1.4 Les adjuvants

Les deux adjuvants nécessaires pour la formulation des BAP sont les super plastifiants et l'agent de viscosité

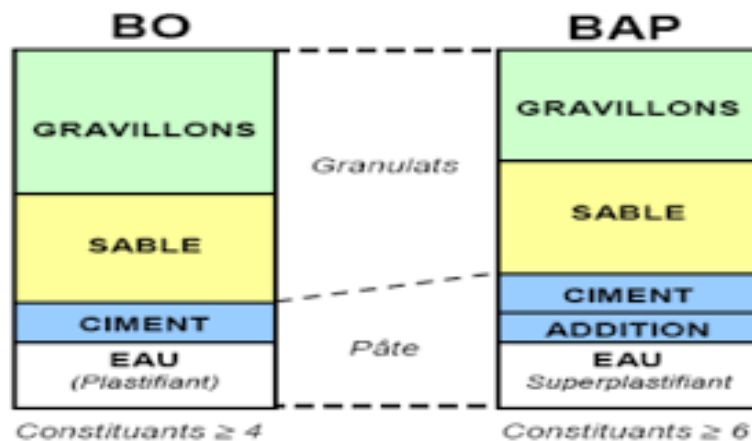


Figure II. 8. . Composition s'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP) Aspect à l'état frais d'un (BO) et d'un (BAP)

En résumé, les composants de base d'un BAP sont identiques à ceux d'un béton vibré mais leurs proportions sont différentes (figure I.8). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les super plastifiants) sont nécessaires.

II.6. Caractérisation d'un béton auto plaçant

II.6.1 Propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton auto plaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [2], [10].

II.6.1.1 Le remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto plaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [2].

Tableau II. 2. Classe d'étalement.

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

II.6.1.2 La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [12],[13].

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

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

II.6.1.3 La capacité de passage

Le béton auto plaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [2]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure II.7 ci dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

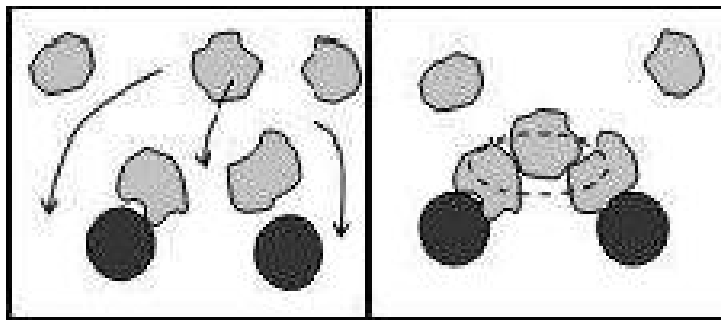


Figure II. 9. Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers.

Donc, un béton est qualifié d'auto plaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau I.2.

Tableau II. 3. 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 super plastifiants
		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

II.6.2. Caractérisation des 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 auto plaçant.

II.6.2.1 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 II.10) [2].

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton auto plaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [14], [15].

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).

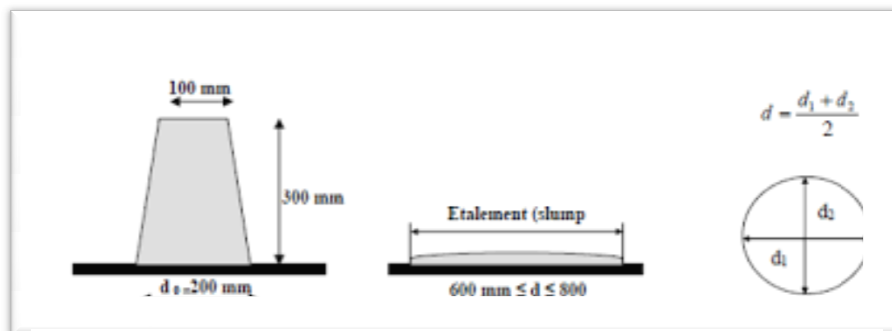


Figure II. 10. Essai d'étalement.

- **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 T_{50} , est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton auto plaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes [16], [17]. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons auto plaçant avec une faible vitesse de déformation [18], [19].

II.6.2.2. 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 (figure I.6) 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 H1 et H2 et on exprime le taux de remplissage H2/H1.

Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage standard pour des ouvrages de génie civil très ferrillés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC [2], le taux de remplissage doit être supérieur à **0,8**.

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

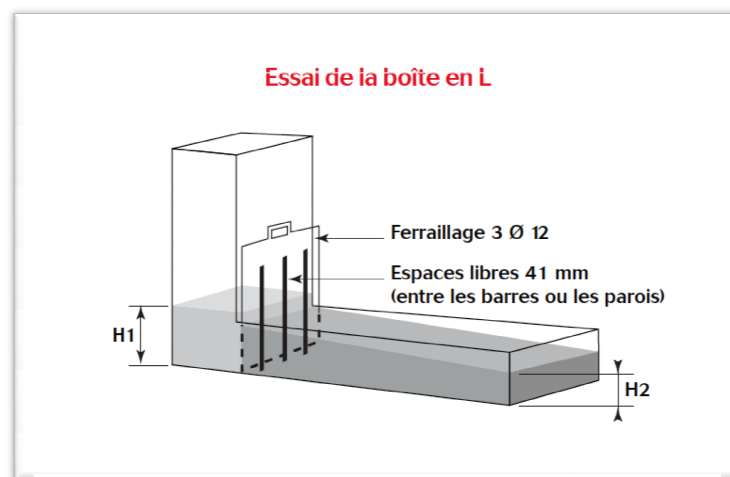


Figure II. 11. Boite en L.

II.6.2.3 Essais de ségrégation statique

- **Essai de la stabilité au tamis**

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

Pour caractériser la ségrégation statique d'un BAP on utilise l'essai de stabilité au tamis (figure I.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 [2].

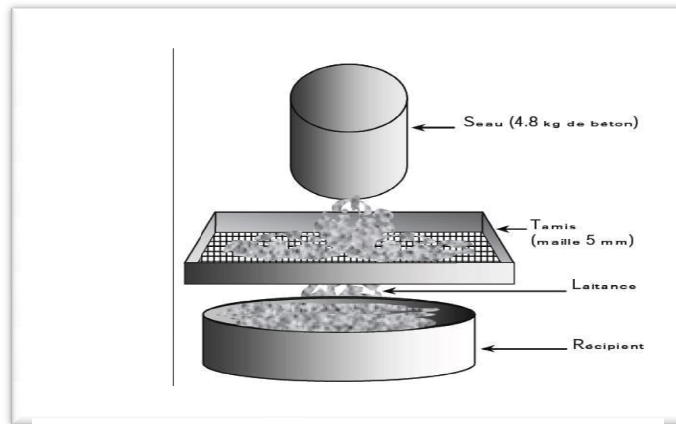


Figure II. 12. Essai de la stabilité au tamis.

- **Critères d'acceptabilité**

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

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

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

$\text{Plaitance} > 30\% \rightarrow$ stabilité très mauvaise.

Ces critères sont particulièrement adaptés aux applications en éléments verticaux.

II.6.2.4 Ressuage

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

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure I.10) : 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.

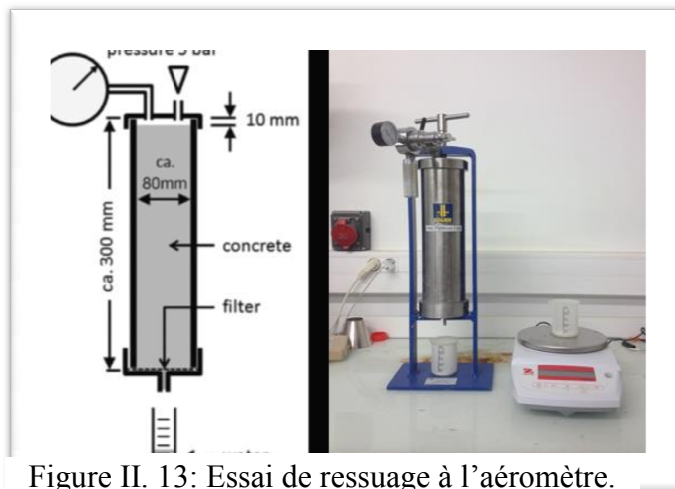


Figure II. 13: Essai de ressuage à l'aéromètre.

Figure II. 14. Essai de la stabilité au tamis.

II.7. Les approches de formulation

II.7.1. 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 [20], [21], [22], 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 300 à 350 kg/m³. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/ m³.
- Le dosage en super plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

II.7.2. Formulations des BAP existants dans la bibliographie

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

II.7.2.1. Approche japonaise

Considérée comme la méthode générale de formulation, l'approche japonaise a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, Ozawa et al [22], [23], [24], [25], [26] (documents pour la plupart en japonais, ceux-ci sont rapportés par [12]).

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

Le volume du gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier.

Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous-dimensionné pour pouvoir éviter les risques de blocages, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). Le béton obtenu est ainsi loin d'un optimum économique. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. En effet, Edamatsu et al [21] ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

Travaillant avec des matériaux locaux, d'autres auteurs (Pelova et al [12]) ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, et obtenir un béton auto plaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale.

II.7.2.2. Approche CBI (suédoise)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cément och Betong Institutet) [27], [28], [29] et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton.

Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs ([30], [31], [32]- cités par [12]) sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés).

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

Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par Bui et al [19], qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton auto plaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

II.7.2.3. Approche LCPC

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible [33], [34] qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (BétonlabPro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [34], et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons auto plaçant).

Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs [34] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

- **Bilan**

Nous avons présenté le principe des trois méthodes de formulations de BAP les plus répandues, ainsi que leurs modifications. Des auteurs comme Turcry et al [35] ont testé les trois approches et souligné quelques remarques issues des essais qu'ils ont menés. Ils estiment que l'approche LCPC (appuyée par le logiciel développé) donne les résultats les plus satisfaisants [35].

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

II.8. Propriétés des BAP à l'état durci

Dans cette partie, nous résumons rapidement les différences qui existent entre les propriétés des bétons auto plaçant 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 [36], [37]. 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).

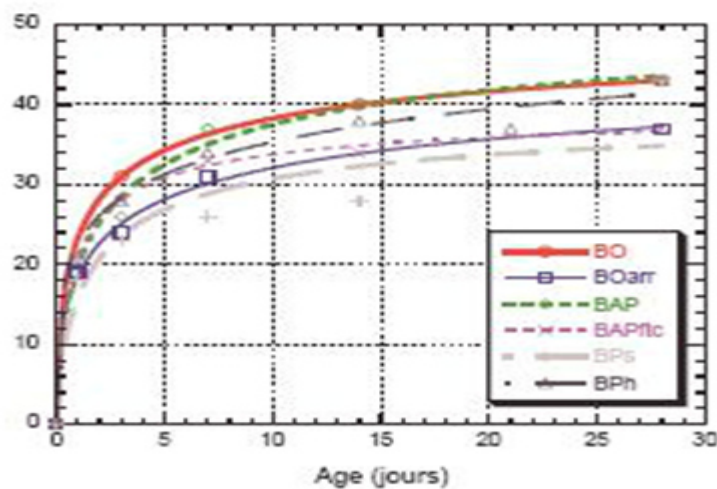


Figure II. 15. Résistance en compression de différents mélanges.

II.8.1. Propriétés mécaniques

II.8.1.1. Résistance mécanique

Considéré comme un mélange diphasique à l'état frais (phases solide et liquide), le béton auto plaçant possède une structure plus homogène que le béton ordinaire vibré, grâce notamment à une résistance à la ségrégation élevée, conférant au béton auto plaçant une amélioration de résistance mécanique.

Les bétons auto plaçant présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent [37], [38].

L'utilisation des fillers dans la formulation des BAP génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [39], [40]. Lorsqu'elles sont bien dispersées dans le béton, les particules fines des fillers favorisent l'hydratation du ciment, et conduisent à une matrice cimentaire de structure plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

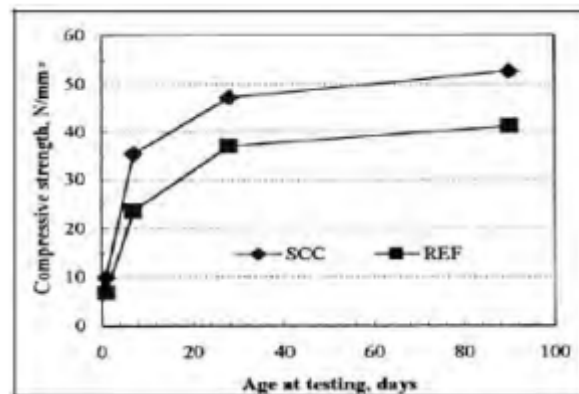


Figure II. 16. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant.

II.8.1.2. Module d'élasticité statique (en compression)

Des bétons auto plaçant et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par [37]. Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons auto plaçant.

En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

II.8.1.3. 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 auto plaçant et les bétons ordinaires [37]. Le retrait au jeune âge en dessiccation des bétons auto plaçant est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

II.8.1.4. Retrait à l'état durci

En dessiccation, les bétons auto plaçant et les bétons ordinaires vibrés possèdent en général un retrait total équivalent. Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées (pour les BHP), où le retrait des BAP est supérieur. En mode endogène, les bétons auto plaçant et les bétons ordinaires présentent un retrait similaire à 28 jours.

Au delà d'un an, les BAP présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BO. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton sont dues au volume de pâte qui est plus important dans les bétons auto plaçant [37].

II.8.1.5. Déformations et fluage

Les bétons auto plaçant subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [37]. Les déformations spécifiques propres et totales ainsi que le fluage spécifique, sont légèrement supérieurs dans le cas des bétons auto plaçant [36], 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 résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons auto plaçant est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons auto plaçant et les bétons ordinaires [37].

II.9. Fabrication, transport et mise en place des BAP

II.9.1. Fabrication des BAP

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur [5].

II.9.2. Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton auto plaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres :

(Le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.)

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire [41].

II.9.3. Mise en place des BAP

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton auto plaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton auto plaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre [42].

II.10. Conclusion

Dans le cas du béton auto plaçant on renonce à toute forme de compactage après le coulage du béton frais dans le coffrage. Ceci permet entre autre d'accroître la productivité, d'améliorer la situation sur le chantier, d'augmenter la durabilité et autorise également l'exécution du bétonnage dans des conditions spécifiques.

Les propriétés les plus importantes d'un BAP par rapport au béton ordinaire sont une fluidité très élevée, la résistance à la ségrégation et la capacité à combler intégralement l'espace entre les barres d'armatures.

Tandis que l'aptitude à la déformation et la résistance à la ségrégation dépendent des composants intervenant dans le béton et de la formulation, l'aptitude à envelopper intégralement l'armature dépend de la forme du coffrage, de la teneur et de la densité de l'armature. Pour atteindre cette propriété, il convient de tenir compte de la disposition de l'armature et de contrôler le volume et la taille maximale des grains des granulats.

Ceci est obtenu grâce à une optimisation spécifique, composée pour l'essentiel d'une teneur en liants suffisante, d'une composition des granulats équilibrée avec une teneur en fines accrues et d'un super plastifiant approprié.

Chapitre III

Etude Expérimentale

III.1.Introduction

L'objectif de ce programme de recherche est de donner les différentes caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation pour développer des formulations de béton et béton auto plaçant, tout en se basant sur les résultats obtenus par les essais d'optimisations du squelette granulaire (sable, graviers) d'une part, et la pâte liante (ciment, eau, super plastifiant et fumée de silice) d'autre part.

Cette optimisation conjointe nous permet d'obtenir un béton auto plaçant de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques.

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, qui sont disponibles dans le laboratoire de la faculté de génie civil tels que les granulats et le sable et dans le marché Algérien tel que le ciment, la fumée de silice et les adjuvants.

III.2. Matériaux utilisés

III.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un Ciment Portland Composé (CPJ CEM II 42.5)



Figure III. 1. Le ciment utilise.

III.2.2. Granulats

Sont utilisés dans cette étude des granulats classiques et granulats minéraux de usine ALGEXPAN à Bouinan (Blida) (argile expansés). Ils sont de quatre classes granulaires: Sable 0/3, Gravier 3/8 et Gravier 8/16. Gravier 16/25.



Figure III. 2. Les granulats légers utilisés (l'argile expansée).

III.2.3. L'eau de gâchage

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

III.2.4. Adjuvant (Super plastifiant)

Le Super plastifiant haut réducteur d'eau SIKA Viscosité – 625. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale de Super-plastifiant, il diminue considérablement la teneur en eau du béton.



Figure III. 3. Le super plastifiant SIKA viscosité – 625.

Tableau III. 1. Quelques caractéristiques SIKA viscosité – 625

Caractéristiques	Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore	Le dosage recommandé
résultats	Liquide	Marron	5.0±1.0	1.08±0.015	<0.15%	0,5% à 2%

III.2.5. Ajout minéral

En utilise la fumée de silice Condensil S-95 DP SIKA, Ultrafine et dotée d'un fort pouvoir pouzzolanique, la fumée de silice améliore les performances mécaniques à longs termes.



Figure III. 4. La fumée de silice Condensil S-95 DP SIKA.

Tableau III. 2. Quelques caractéristiques de la fumée de silice

Caractéristiques	Forme	Couleur	Densité absolue
Résultats	Poudre	Grise	2.24

III.3. Caractérisation des matériaux

Avant d'entamer une formulation, il convient de connaître les caractéristiques des matériaux utilisés à cet effet par le biais d'essais normalisés au laboratoire.

III.3.1. Essais sur granulats**Masse volumique apparente et absolue**

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Le volume absolu ne prend pas en considération les vides inclus et le volume apparent fait intervenir les vides intra et inter-granulaires.

Tableau III. 3. Masse volumique apparente et absolue des granulats classique.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.55	2.65	2.65	2.65
Masse volumique apparents (g/cm³)	1.6	1.49	1.38	1.28

Tableau III. 4. Masse volumique apparente et absolue des granulats légers.

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
Masse volumique absolue (g/cm³)	1.95	1.34	0.93	1.06
Masse volumique apparents (g/cm³)	0.81	0.78	0.6	0.55

- **Coefficient d'absorption (NF P18-554)**

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures. La porosité est le rapport du volume des vides au volume réel

(apparent) de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est le rapport de la masse d'eau absorbée par le matériau jusqu'à saturation à la masse de l'échantillon sèche. Les résultats de caractérisation de l'absorption des différents granulats sont récapitulés dans le tableau III.5.

Tableau III. 5. Résultats de l'absorption des granulats classiques

- **Module de finesse du sable (NF P18-304)**

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du

Granulats	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
Absorptions(%)	3.2	2.43	1.31

mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons. La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Les résultats sont indiqués dans le tableau III.6. Suivant.

Tableau III. 6. Module de finesse de sable (classique).

Granulats	Sable (0/3)	Spécification
Module de finesse	2.19	2,8 < MF < 3,2 sable grossier 2,2 < MF < 2,8 sable moyen 1,8 < MF < 2,2 sable fin

En conclusion, le sable est fin.

-

III.4. Elaboration des bétons

III.4.1. Formulation des bétons ordinaire

Une méthode pratique et simplifiée a été utilisée pour l'élaboration du béton ordinaire (vibré), celle de « DREUX GORISSE ». Elle permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié. Le mode opératoire est le suivant :

- **Critère de résistance** : Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28j} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression σ_{28j} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28j} = 1,15 \times \sigma_{28j}$$

La résistance désirée pour le béton témoin à 28 jours est:

$$\sigma_{28j} = 25 \text{ Mpa}$$

D'où la résistance moyenne visée pour le béton témoin à 28 jours :

$$\sigma'_{28j} = 1,15 \times 25$$

$$\sigma'_{28j} = 28,75 \text{ Mpa}$$

- **Dosage en ciment et en eau** :

Le rapport C/E est déterminé grâce à la formule de Bolomey :

$$R'_{28} = G \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$$D'où : \frac{C}{E} = \frac{R'_{28}}{G \sigma'_c} + 0,5$$

R' : Résistance visée à 28 jours.

σ' : Classe vraie de ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

C : Dosage en ciment (Kg de ciment /m de béton).

E : Dosage en eau (Kg d'eau /m de béton ou litre d'eau/ de béton).

Tableau III. 7. Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	$D \leq 16\text{mm}$	$25 \leq D \leq 40\text{mm}$	$D \geq 63\text{mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Les granulats utilisés ont un diamètre de 16 mm et sont de bonne qualité, d'où un coefficient granulaire **G=0,45**.

Le ciment retenu est un CPJ CEM II / 42,5.

Donc Le rapport $\frac{C}{E}$ vaut : $\frac{C}{E} = \frac{28,75}{0,45 \times 42,5} + 0,5 = 2$.

Dosage en ciment par de béton

Connaissant le rapport $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit, grâce à l'abaque (fig. II.6), en fonction de A, le dosage en ciment correspond

$$\frac{C}{E} = 2 \text{ et } A = 5.5\text{cm}$$

L'abaque donne la valeur du dosage en ciment : C=350Kg (Voir la figure II.6)

On déduit la valeur de E qui est:

$$E = 175 \text{ kg}$$

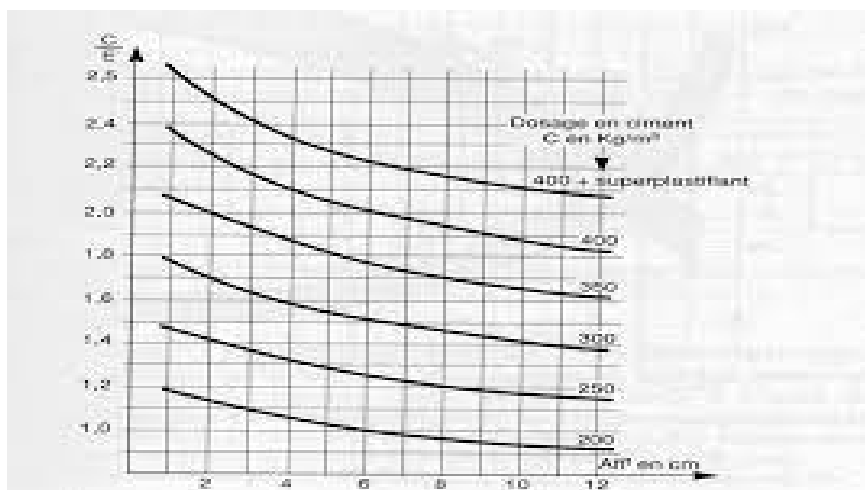


Figure III. 5. Abaque permettant la détermination du dosage en ciment.

III.4.1.1 Dosage du constituant du béton ordinaire lourd en kg/m^3

Le tableau III.8 suivant résume le calcul des proportions de chaque constituant pour le béton ordinaire lourd en kg/m^3 .

Tableau III. 8. Dosage du constituant du béton ordinaire lourd en kg/m^3 .

Constituant	Ciment	Eau	Sable	Gravier	E/C
Dosage (kg/m^3)	350	175	875	1225	0.5

Tableau III. 9. Le taux de dosage.

Constituant	Ciment	Eau	Sable (0/3)	Gravier
Taux de dosage(%)	10.33	16	31.39	42.28

III.4.1.2 Dosage du constituant du béton ordinaire léger en kg/m^3

Le tableau III.10 suivant résume le calcul des proportions de chaque constituant pour le béton ordinaire léger.

Tableau III. 10. Dosage des constituants du béton léger.

Constituant	Ciment	Eau	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Gravier (15/25)
Dosage (kg/m^3)	350	175	671,18	207.25	143	163

II.4.2 Formulation des bétons auto plaçant

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. Certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Un rapport G/S = 0.9.
- Un rapport E/C = 0.5.
- Un dosage en ciment de 400kg/m³.
- Le volume d'air occlus (A) est de l'ordre de 5%.
- Un pourcentage en ajouts (super plastifiant, poudre de marbre, déchet de brique, tuf) déterminé par tâtonnement.

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a fixé le dosage de ce dernier à 350 kg/m³, ainsi le rapport E/C à 0,5 pour tous les bétons testés.

Le rapport G/S est fixé à 0.9 pour augmenter la quantité de sable, celle-ci permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier, ainsi pour diminuer la quantité des gros granulats dans le but d'éviter le risque de blocage.

Dans 1 de béton on a les constituants suivants :

$$C = 350 \text{ Kg/m}^3$$

$$F = 150 \text{ Kg/m}^3$$

$$E/C + F = 0,35 \Rightarrow E = 0,35 \times (350 + 150) = 175 \text{ l/m}^3$$

- Volume de la pate = 400 Kg/m³
- Volume des granulats sec = 600 Kg/m³

Puisque on a fixe G/S=0.9 :

$$G/S = 0.9 \Rightarrow G = 0.9 \times S$$

$$G + S = 600 \Rightarrow 0.9S + S = 600$$

$$S = 600/1.9 = 315,78 \text{ Kg/m}^3$$

$$G = 600 - S = 600 - 315,78 = 284,22 \text{ Kg/m}^3$$

- **Las masses des constituants pour 1m³.**

$$P_s = m_s / v_s \rightarrow m_s = p_s \times v_s = 2.55 \times 315.78 = 805.03 \text{ kg/m}^3$$

$$P_g = m_g / v_g \rightarrow m_g = p_g \times v_g = 2.65 \times 284.22 = 758.7 \text{ kg/m}^3$$

$$M_g (3/8) = 758.7 \times 2/3 = 505.8 \text{ kg/m}^3$$

$$M_g (8/15) = 758.7 \times 1/3 = 252.9 \text{ kg/m}^3$$

Sup = (1 %) par rapport au ciment.

$$C = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$F = 150 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 175 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Sup} = 3.5 \text{ kg/m}^3$$

$$S = 805.03 \text{ kg/m}^3$$

$$G (3/8) = 505.8 \text{ kg/m}^3$$

$$g (8/15) = 252.9 \text{ kg/m}^3$$

III.4.2.1 Dosage du constituant du béton auto plaçant lourd en kg/m³.

Le Tableau Suivant résume le calcul pour le béton auto plaçant lourd.

Tableau III. 11. Dosage du constituant du béton auto plaçant lourd en kg/m³.

Composant	Dosage (kg/m ³)	Densité absolue
Ciment	350	3.1
Fumée de silice	150	1.03
Sable (0/3)	805.03	2.55
Gravier (3/8)	505.8	2.65
Gravier (8/15)	252.9	2.65
Eau	175	1
Super plastifiant	3.5	1.2

On complété les calcule du béton auto plaçant léger par la même méthode, la résume de calcule dans le tableau III.12.

III.4.2.1 Dosage du constituant du béton auto plaçant lourd en kg/m³.Tableau III. 12. Dosage du constituant du béton auto plaçant léger en kg/m³.

Composant	Dosage (kg/m ³)	Densité absolue
Ciment	350	3.1
Fumée de silice	150	1.03
Sable (0/3)	617.68	1.95
Gravier (3/8)	127.77	1.35
Gravier (8/15)	176.36	0.93
Eau	175	1
Super plastifiant	3.5	1.2

Les compositions des différents bétons sont résumées dans le tableau ci dessous :

Tableau III. 13. Composition des différents bétons pour 1m³.

Composant (kg/m ³)	BO	BOL	BAP	BAPL
Ciment	350	350	350	350
Fumée de silice	/	/	150	150
Sable (0/3)	875	671.18	805.03	617.68
Gravier (3/8)	408.33	207.25	505.8	127.77
Gravier (8/15)	408.33	143	252.9	176.36
Gravier (8/15)	408.33	163	/	/
Eau	175	175	175	175
Super plastifiant	/	/	3.5	3.5

III.5. ESSAIS SUR BETON**III.5.1. INTRODUCTION**

Cette partie a, dans un premier temps, pour but de comparer entre des différents bétons. Ensuite, de s'intéresser aux essais sur béton, permettant ainsi de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et d'évaluer le comportement des BAP par rapport aux bétons traditionnels vibrés. Pour cela on a choisi de faire varier quelques paramètres tels que la nature granulat (granulat lourd, granulats léger) pour un même type de matériau et un dosage en ciment constant. Le dosage en eau n'a pas été modifié lors de l'élaboration des BAP. Les résultats obtenus ont été comparés entre eux.

Les bétons ont été élaborés avec les des granulats classique et granulat léger (argile expansée) :

- Gravier classique de classe : 3/8 ,8/16 et 16/25.
 - Gravier léger (argile expansée) : 3/8 ,8/16 et 16/25.
 - Sable classique et léger : 0/3.
 - Ciment CPJ CEMII 42.5
- **Les ajouts utilisés**
 - La fumée de silice Condensil S-95 DP SIKA.
 - Le super plastifiant SIKA viscosité – 625.
 - **Variables de l'étude**
 - Les types des granulats (classique et léger).
 - La présence des ajouts minéraux dans le béton auto plaçant.
 - **Bétons élaborés :**
 - Béton ordinaire avec des granulats classiques.
 - Béton ordinaire avec des granulats léger (argile expansée).
 - Béton auto plaçant avec des granulats classique.
 - Béton auto plaçant avec des granulats léger (argile expansée).

Dans ce cadre, ont été confectionnées :

- 09 éprouvettes cubiques $(15 \times 15) \text{ cm}^3$ du béton ordinaire lourd, pour la mesure de la résistance à la compression simple.
- 09 éprouvettes cubiques $(15 \times 15) \text{ cm}^3$ du béton ordinaire léger, pour la mesure de la résistance à la compression simple.
- 09 éprouvettes cubiques $(15 \times 15) \text{ cm}^3$ du béton auto plaçant lourd, pour la mesure de la résistance à la compression simple.
- 09 éprouvettes cubiques $(15 \times 15) \text{ cm}^3$ du béton auto plaçant léger, pour la mesure de la résistance à la compression simple.

III.5.2. Confection des bétons

III.5.2.1. Préparation de la gâchée

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical et il a une capacité de 60 litres.

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage.
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super plastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs, les introduire dans le malaxeur et le pré humidifié avec 10% de l'eau de gâchage.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 secondes.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélanger pendant 1 minute 30 secondes.
- Introduire la partie restante d'eau graduellement et malaxage pendant 2 minutes.
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.
 - Essai d'étalement et d'affaissement.
 - Essai de la boîte en L (Essai du L-box).
- Mettre en place les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les bétons vibrés ont été mis en place par vibration à l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels (principalement aiguille vibrante et table vibrante). Les bétons auto plaçant n'ont subi aucune vibration, ni autre méthode de compaction.

III.5.2.2. Conservation des éprouvettes

Après le coulage, les éprouvettes sont laissées à température ambiante au laboratoire et sont démoulées après 24 heures. Par suite, elles sont conservées sous un chiffon maintenu humidifié afin de garantir l'hydratation du ciment jusqu'à l'échéance déterminée, à savoir, 28 jour

III.5.3. Essais sur bétons

III.5.3.1 Essais sur béton frais

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

III.5.3.1.1 Essai d'étalement (BAP) ou d'affaissement (BO)

Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue. Il faut rappeler qu'est considéré comme auto plaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres. Pour la formulation vibrée (BO), c'est le test traditionnel de l'affaissement qui s'est substitué à celui de l'étalement.



Figure III. 6. Essai d'affaissement du béton ordinaire lourd.

Ne peut pas faire l'essai d'affaissement sur le béton léger parce que les granulats est léger. Le poids du gravier n'affecte pas du béton, donc l'expérience d'affaissement n'est pas prise en compte dans ce type de béton.



Figure III. 7. Essai d'étalement.

Le tableau III.14 représente les Résultats de l'essai au cône d'Abrams

Tableau III. 14. Résultats de l'essai au cône d'Abrams.

Type du Béton	BO	BOL	BAP	BAPL
Etalement (mm)	/	/	620	610
Affaissement (mm)	55	0	/	/

On peut constater que les bétons auto plaçant respectent le critère d'étalement (compris entre 60 et 75cm).

Sur la consistance du béton ordinaire (vibré) ; aucune condition n'avait été fixée au préalable. L'affaissement obtenu est de classe S2 (béton plastique de 5 à 9cm d'après la norme NF EN 206-1).

III.5.3.1.2 Essai de la boîte en « L »

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



Figure III. 8. : Essai de la boîte en L

Tableau III. 15. Résultats de la boîte en « L ».

Type de béton	BAP	BAPL
Capacité de remplissage (H1/H2) %.	88	94

On remarque que la capacité de remplissage requise a été atteinte dans les deux types, qui a dépassé les 80%.

En résumé

Tableau III. 16. Tableau récapitulatif des résultats d'essais à l'état frais de béton.

Type	BO	BOL	BAP	BAPL
L'étalement (mm)	/	/	620	610
L'affaissement (mm)	55	0	/	/
la boîte en « L » %	/	/	88	94
Appréciation visuelle	Bon	Bon	Bon	Bon

Les caractéristiques à l'état frais des bétons sont satisfaisantes.

III.5.3.2. Essais à l'état durci

III.5.3.2.1. Essai de compression uniaxiale (NF P 18-406)

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale (figure III.9). La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette (figure III.10). On note la charge maximale atteinte P (MN) et la surface de chargement S (m^2), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c \text{ (MPa)} = P/S$$

L'aire de la section droite est de $225 \text{ cm}^2 = 0.0225 \text{ m}^2$.

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cubique (15×15) cm^2 , à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale 3000 KN (voir figure II.10). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Figure III. 9. Eprouvettes d'essai de compression.



Figure III. 10. : Presse utilisée pour la compression.

III.5.3.2.2 Résultats de la résistance à la compression des bétons.

Les résultats obtenus de 7 jours sont les suivants :

Tableau III. 17. Résistances à la compression des bétons a'7J (15×15×15) cm³.

Type de béton	La masse de l'éprouvette (Kg)	La force (KN)	Resistance a la compression 7J (MPA)	Moyen (MPA)
Béton ordinaire lourd	/	/	/	20.45
	7.09	418.9	18.6	
	7.01	501.1	22.3	
Béton ordinaire léger	4.57	510.7	22.7	22
	4.57	436.5	19.4	
	4.51	542.2	24.1	
Béton auto plaçant lourd	5.96	192.8	8.6	9.2
	6.07	212.4	9.4	
	6.04	212.8	9.5	
Béton auto plaçant léger	5.08	541.7	24.1	21.5
	5.1	447.6	19.9	
	5.04	461.7	20.5	

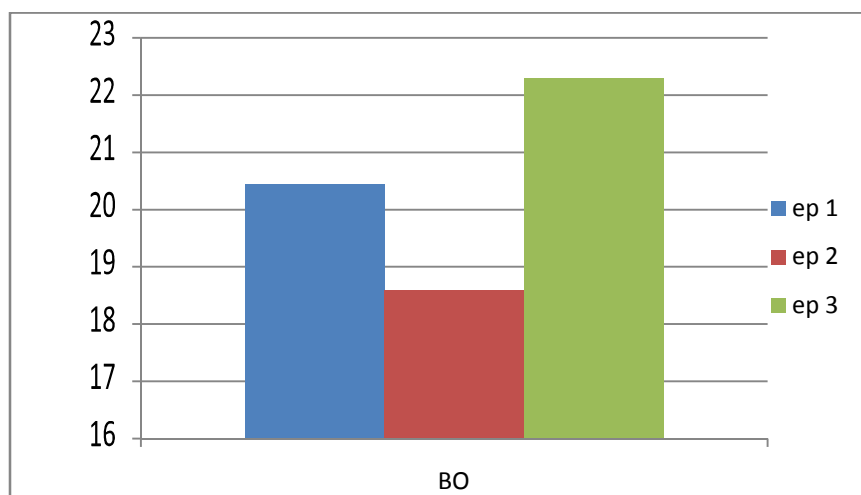


Figure III. 11. Résistance a' la compression a' 7J (MPa) de BO.

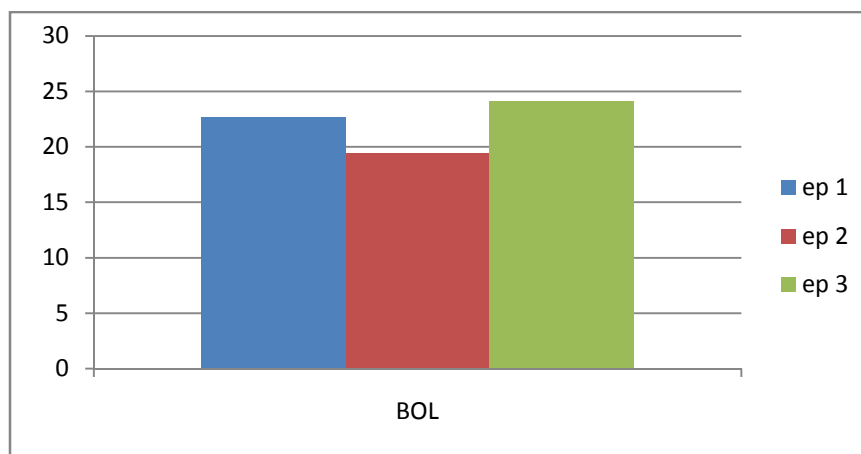


Figure III. 12. Résistance a' la compression a' 7J (MPa) de BOL

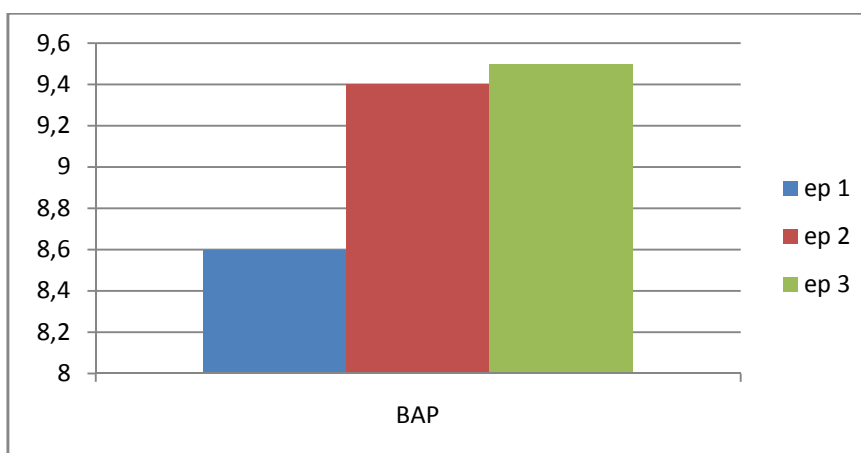


Figure III. 13. Résistance a' la compression a' 7J (MPa) de BAP.

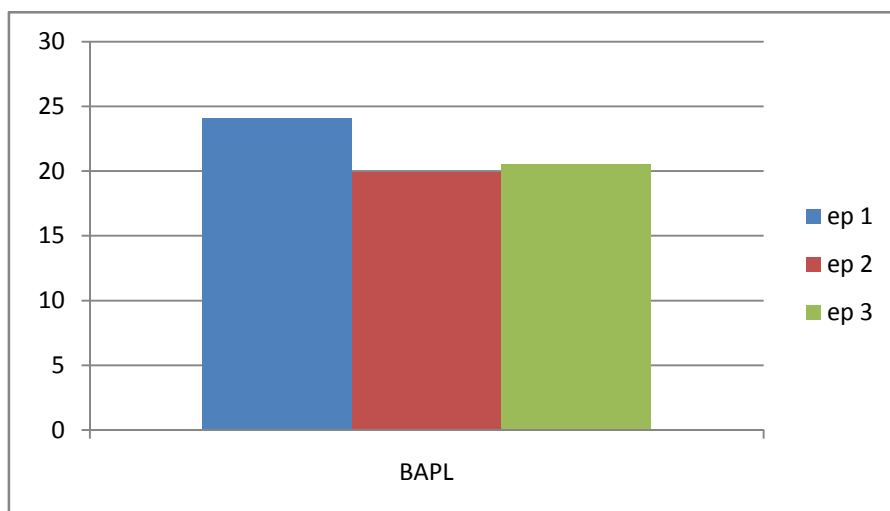


Figure III. 14. . Résistance a' la compression a'7J (MPa) de BAPL.

En résumé

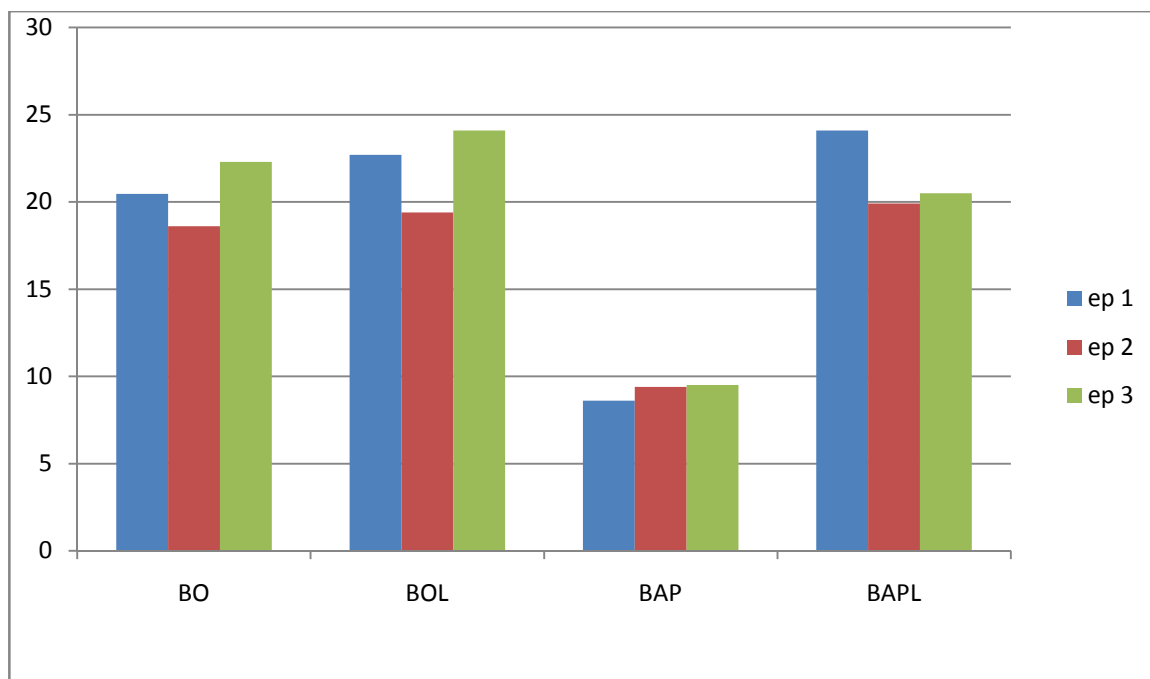


Figure III. 15. Résistance a' la compression a'7J (Mpa) de béton.



Figure III. 16. mode de rupture du béton, éprouvette (15x15) cm³.

La sollicitation à la compression simple des éprouvettes cubique (15x15) cm³ des bétons, s'avère à engendrer les différentes fissures verticales et casées verticales par rapport à l'axe décompression et de longueurs qui arrivent jusqu'à 50% de la hauteur de l'éprouvette ou atteints toute la hauteur de l'éprouvette (Figure III.16), Ces fissures sont dues aux contraintes détractions développées par l'effet de poisson.

Les résultats obtenus de 14 jours sont les suivants :

Tableau III. 18. . Résistances à la compression des bétons a'14J (15×15×15) cm³.

Type de béton	La masse de l'éprouvette (Kg)	La force (KN)	Résistance a la compression 14J (Mpa)	Moyen(MPA)
BO	7.64	541.7	24.1	21.5
	7.64	447.1	19.9	
	7.71	461.7	20.5	
BOL	5.34	794.3	35.3	32
	5.06	592.9	26.4	
	5.29	774.2	34.4	
BAP	6.96	274	12.2	12
	6.85	266.9	11.9	
	6.95	271.4	12.1	
BAPL	5.13	393.3	17.5	19
	5.06	409.8	18.2	
	5.08	481.6	21.4	

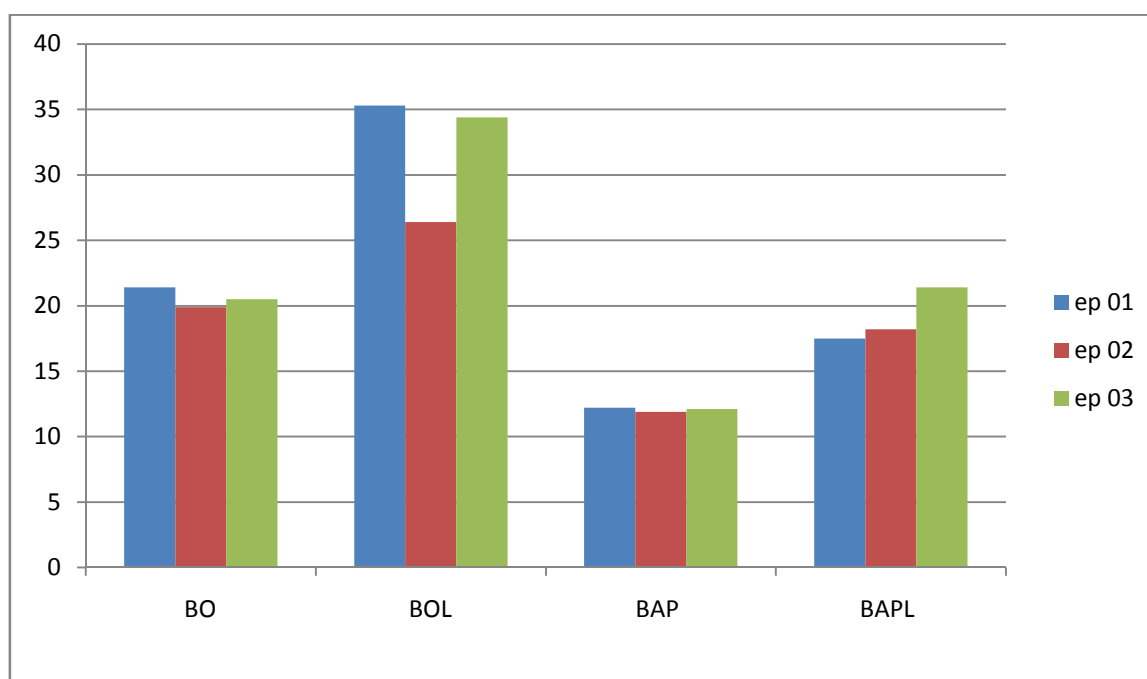


Figure III. 17 .Résistance a' la compression a'14J (Mpa) des bétons.

III.5.3.2.1 Interprétations des résultats.

Sur les histogrammes ci-dessus, il est remarquable que les résistances à la compression de béton ordinaire lourd et léger est presque égalent en 7 jours.

Le béton ordinaire à base des granulats léger simultanément avec le durcissement de la matrice 14 jours, présente une évolution remarquable de la résistance à la compression, contrairement pour le cas du béton ordinaire à base des granulats classique qui présente une légère évolution de la résistance à la compression, avec le même dosage de ciment.

Pour la résistance à 14 jours des bétons auto plaçant lourd, nous avons formulé un béton auto plaçant qui présente une mauvais résistance mécanique à la compression qui donne (>12 MPa), contrairement pour le cas du béton auto plaçant qui donne (19 MPa), La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée donc La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années. Bien que nous ayons utilise le même dosage en ciment et un rapport $E/C = 0.5$ pour tous les bétons. et la seule variable est les granulats

En constatant, que les propriétés physiques des granulats principalement la forme et les caractéristiques surfaciques (classique ou léger) influent directement sur les caractéristiques mécaniques nos bétons.

Conclusion générale

Bien que connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, les bétons légers ont été employé dans notre pays d'une façon timide et individuel, mais ils connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt, qui semble tout à fait mérité en raison de leurs propriétés techniques et économiques intéressantes.

L'unité de production des granulats léger à base d'argile expansée située à Bouinane wilaya de Blida a été visité et ses granulats caractérisée. Cette étude avait pour objectif de valoriser les granulats légers de cette unité dans la fabrication de béton structurel et non structurel en Algérie ainsi que dans le béton autoplaçant.

La synthèse bibliographique réalisée a montré que les caractéristiques des granulats légers influent directement sur ceux des bétons légers. La masse volumique de ces bétons varie entre 800 et 2000 kg/m³. Grâce à leur caractère de légèreté, ces bétons à granulats sont plus faciles à manipuler et à déplacer.

la différence entre les résistances des bétons légers et des bétons usuels est moins marquée que pour les résistances en compression : par rapport aux bétons de référence, les bétons légers montrent une résistance en traction inférieure de l'ordre de 5 à 10% alors que la résistance en compression est plus faible d'environ 10 à 20% . Les résultats obtenus mettent en évidence l'atteinte de valeurs du module élastique plus faibles de presque un tiers pour les mélanges de béton léger par rapport aux mélanges de béton usuel.

La porosité élevée des granulats légers n'affectent pas la perméabilité à l'eau du béton léger et sa durabilité en générale en raison de non continuité des pores.

Le béton léger offre en plus de l'avantage de la légèreté nécessaire dans le cas de sols à faibles portance, La résistance mécanique de notre béton léger a été déterminée par l'essai de compression simple sur des éprouvettes cubique de dimensions (15x15) cm³, La valeur moyenne obtenue pour le béton ordinaire lourd est $\sigma_{c,max}= 21.5\text{MPa}$, $\sigma_{c,max}= 32\text{MPa}$ pour le béton ordinaire léger, $\sigma_{c,max}= 12\text{MPa}$ pour le béton auto plaçant lourd et $\sigma_{c,max}=19\text{MPa}$ pour le béton auto plaçant léger

Références Bibliographiques

- [1] George Dreux, Jean FESTA, « NOUVEAU GUIDE DU BETON » 8ème Édition ;
- [2]-Association Française de Génie Civil, "Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [3]-Collection Technique CIMbéton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.
- [4]- Abib.Z, "formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", thèse de magister USTHB, 2004.
- [5]- Boukni.B, "tenue au feu des bétons autoplaçants", thèse de magister UMC,2007.
- [6]- 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.
- [7]- P. Claude AITCIN, « Liant hydraulique, GCI 710 » Université de SHERBROOKE Canada ;
- [8]-Projet National de Recherche CERIB, " béton autoplaçant BAP " France, Octobre 2001.
- [9]-Chuche.C, Dossier technique, " Les bétons autoplaçants ", MBT France.
- [10]- Turcry.P, " Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation", Thèse doctorale, université de Nantes, 2004.
- [11]- Belhadj.N, " Caractérisation expérimentale des Bétons Autoplaçants en traction directe. Influence des ajouts de déchets de brique, de poudre de marbre et de tuf", mémoire de master en structure, génie civil, 2012.
- [12]- Skarendahl.A, Petersson.O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.
- [13]- Legrand.C, "La structure des suspensions de ciment", Le Béton Hydraulique, Presses de l'ENPC, 1982.

- [14]- Walraven .J, "Structural aspects of self compacting concrete", Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, 1998.
- [15]- 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.
- [16]- 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.
- [17]- 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.
- [18]-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.
- [19]-Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.
- [20]-Jin, "Properties of mortar for self compacting concrete", Thèse de l'Université de Londres, 2002.
- [21]-Ouchi.M , Edamatsu.Y, "A simple evaluation method fointeraction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete", In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Stockholm,1999.
- [22]-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.
- [23]- 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.

- [24]- Okamura.H, Maekawa.K, Ozawa.K, "High performance concrete", First ed. Gihouda Publishing Co, Tokyo, 1993.
- [25]-Okamura.H, Ozawa.K, "Mix design method for self-compacting concrete", Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, 1995.
- [26]- Okamura.H, Ouchi.M, "Self-compacting high performance concrete", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol1, 1998.
- [27]- 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.
- [28]-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.
- [29]- Billberg.P, "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.
- [30]- 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.
- [31]-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.
- [32]- Tangtermsirikul.S, Van.B.K, "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete", Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69, 1995.
- [33]- 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.
- [34]- De Larrard.F, Sedran.T, "Mixture -proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 32, 11, pp. 1699-1704, 2002.

- [35]-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.
- [36]- Proust.E, "Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2002.
- [37]- Assié.S, "Durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.
- [38]- 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.
- [39]- Pera.J, Husson.S, Guilhot.B, "Influence of finely ground limestone on cement hydration", Cement and Concrete Composites, 21, 2, pp. 99-105, 1999.
- [40]-De Larrard.F, "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000.
- [41]- CIMbéton, Le béton "Les techniques de mise en place du béton évoluent", CSTB magazine, N°109 Novembre 1997.
- [42]-Bertin.JF, "Recommandations de mise en œuvre des bétons autoplaçants et des autonivelants", Fédération Française du Bâtiment, SEBTP (Paris), 2003.