République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de la Technologie

Projet de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master LMD

Filière: Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Formulation d'un béton autoplaçant à matrice ciment-marbre

Préparés par :

Melle. ALLAG AMENE

Melle. BOUSSERIA FATMA

Proposé et dirigé par par :

Dr :Boucherit Dalila

Dr : Djazeri Amina

Septembre 2020

Remerciements

Nous remercions avant tout, « Dieu » le tout puissant,pour avoir permis de présenter ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteur Dr BOUCHRIT DALLILA pour sa Disponibilité ,aide durant tout le déroulement de tout ce projet. Grâce à son dévouement, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.

Nous remercions Melle. DJAZERI AMINA Car le grand plaisir revient en premier lieu pour leurs conseils, encouragements, et aide pendant les essaies réalisés au niveau de laboratoire.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall technologique pour son aide et sa disponibilité.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil qui nous ont offert tout ce savoir.

Enfin nous remercie tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Nous les dit merci de tout notre cœur.

Dédicace

C’est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes

les plus chères au monde après dieupour leurs sacrifices :

A ma mère qui a veillé sur moi jour et nuit depuis mon enfance qui
ma donné l’amoure la gentillesse le respect à moi-même la reine demon cœur.

A mon père qui a sacrifie toutes sa vie afin de me voir devenir ceque je suis.

A mes sœurs : Nadia, Asmaa

A mon frère : Morad ; Mohamed

A mon mari : Sidahmed

A toute la famille : Allag, Kanoudi et Morsli sans exception.

À mon oncle et à ses enfants.

Mes amis : Rania, Aida, Aicha, Radia

A tous mes collègues du 2éme années master génie civil structure
et matériaux de construction.

Merci....

Amene

Dédicace

Au premier lieu, nous tenons à remercier « Allah » qui nous a donnée le courage et la Volonté pour terminer ce travail.

A ma très chère maman

Raison de mon existence. pour tes sacrifices, ton soutien, ta générosité et ta tendresse. tu étais toujours là prés de moi pour me soutenir, m'encourager et me guider avec tes précieux conseils. Aucun mot ne saurait exprimer ma grande reconnaissance, ma gratitude et mon profond amour. Qu'allah te garde et te procure une bonne santé et longue vie. je t'aime Mama.

A mon cher père

Source de sacrifice. Pour ta tendresse, ton soutien, tes conseils et tes encouragements. Veuillez trouver dans ce travail l'expression et le témoignage de mon attachement, ma reconnaissance et mon respect. Qu'Allah t'accorde la santé et la longue vie.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

À mes frères Fath et farse

A mes sœurs Hada, Nora, Fethia, Gania, Lewiza et Farida.

Je remercie mon binôme amene qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail

À toute la famille Bousseria grand et petit et à mes chers profs aussi pour leurs grands soutiens morals

De même pour tous mes camarades de promotion 2019/2020 et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis

Merci

Fatma

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو استعادة وإعادة تدوير نفايات الرخام ودمجها في كتلة الخرسانة ذاتية الدمج عن طريق استبدال حجم الاسمنت بنسب مختلفة من مسحوق الرخام (0٪ , 5٪ 10٪, 15٪)على التوالي وتم تحليل الخصائص في الحالة الطازجة للمخالط المختلفة ومقارنتها مع الخرسانة ذاتية التماسك (بدون إضافات) .

النتائج التي تم الحصول عليها:زيادة ميوعة الخرسانة ذاتية التماسك المائعة ومنه يمكننا اعتبار الخرسانة المتحصل عليها كمواد بيئية ويوصي بيه بشدة لمهندسي البناء ومستخدمي الاسمنت فالبناء.

Résumé

L'objectif principal de ce projet est de récupérer et de recycler les déchets de marbre et de les incorporer dans un béton auto-plaçant en remplaçant des proportions de ciment (5%, 10 %, 15 %, 20 %) par poudre de marbre.Les propriétés à l'état frais ont été analysées en comparaison avec celles le béton autoplaçant de référence (sans ajouts). .

Les résultats obtenus montrent une augmentation de la fluidité desBAP, et à partir de là, nous pouvons considérer le béton obtenu comme un matériau environnemental et il est fortement recommandé pour les ingénieurs en construction et les utilisateurs de ciment dansla construction.

Abstract

The main objective of this project is to recover and recycle waste marble and incorporate them into a self-consolidating concrete by replacing proportions of cement (5%, 10%, 15%, 20%) by marble powder. The properties in the fresh mixtureswere analyzed in comparison with those of the reference self-consolidating concrete (without additions). .

The results obtained show an increase in the fluidity of the BAPs, and from these we can consider the obtained concrete as an environmental material and it is highly recommended for construction engineers and users in cement of construction.

SOMMAIRE

Dédicaces
Remerciement
Résumés
Sommaire
Liste des tableaux
Liste des figures
Symboles et Abréviations

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale……

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I .Généralités sur le béton……..……05
I.1. Introduction……05
I.2. Définition……...……05
I.3.Béton……..... 05
I.4.Les type du béton……..……..06
A. Leur destination..... …….06
B. Leur masse volumique……...……..06
C. Leur granularité……...07
D. Leur consistance (cône d'Abrams)……..07
E .Leur résistance à la compression……07
I.5. Les bétons autoplaçants……07
I.5. 1. Introduction……..…….08
I.5. 2. Définition du béton autoplaçant ……..……08
I.5. 3. Domaine d'utilisation des BAP……..08
I.5. 4. Les différents Constituants d'un BAP……..10
- Les granulats …….....11
- le Ciment…….……12

-L'agent de viscosité……13
- L'eau de gâchage ……..……..…….15
-Les adjuvants…….……..….16

I.6. Formulations des BAPs 20
I.6.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)..... 20
I.6.2. Formulation LCPC (France)..... 21
I.6.3. Formulation CBI modifiée..... 22
I.6.4. Formulation JSCE..... 23
I.7. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais 24
I.7. 1. Essai d'étalement……..24
I.7. 2. Essais au cône d'Abrams…….24
I.7. 3. Essai de la boite en L (L-box test) ……..……25
I.7. 4. Essai de stabilité au tamis..... 25
I.7. 5. Essai de l'entonnoir en forme de «V» « V-Funnel »…… ……26
I.7. 6.Essai de la boite en U (U-Box) …….……..27
I.7. 7.Essai de la couronne J (J-Ring)……..….. 28
I.8. Propriétés du béton durci ..... .29
I.8.1. Résistance à la compression 29
I.8.2. Résistance à la traction 30
I.9. Les Avantages et inconvénients des BAP…….30
I.10. Recyclage des déchets 31
I.11. Marbre et déchets de marbre 31
I.11.1. Historique ……..……31
I.11.2. Définition des marbres…….……31
I.11.3. Type de marbre……32
I.11.4. Mode de fabrication……..32
I.11.5. Caractéristiques et Propriétés de marbre……....33
I.11.6. Valorisation des déchets de marbre dans et le béton autoplaçant ..... .35
I.11.6. 1 . Etat frais…….……35
I.11.6. 2 . Etat durci..…… ……...…….37
I.12. Conclusion..... 41

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

II.1. INTRODUCTION. ……43

II .2. Caractérisation des matériaux utilisés……...……43

II.2.1-Le sable…….43

II.2.2 : Les graviers……43

II.2.3 : le ciment ……44

II.2.4 : Déchets de marbre……..……44

II .2.5 : Superplastifiant ……..……46

II.2.6 : L'eau de gâchage……..……47

II.3. Caractérisation des matériaux……47

II.3.1. Les essais sur granulats……..……47

II.3.1.1. Analyse granulométrique(EN 933-1 et EN 933-2)……..……47

A. But de l'essai……..……47

B. Equipement nécessaire…….……47

C. Description de l'essai…….……. 48

D. Expression des résultants…….……48

II.3.1.2. Masse volumique des granulats……..……49

A. Masse volumique apparent (NF P18-555)……...……49

A.1. Définition……..……49

A.2. Conduite de l'essai……...…49

B. Masse volumique absolue (NF P18-555)…….…….…50

B.1. Définition……..……50

B.2. Conduite de l'essai……50

II.3.1.3. Equivalent de sable (NF P18-598)……..……50

A. But l'essai……..51

B. Conduite de l'essai……51

C. Expression des résultants……..52

II.3.1.4. Coefficient d'absorption d'eau (NF P18-555)…….52

II.3.1.5. Module de finesse de sable (NF P 18 -304)…….53

II.4. Séquence de malaxage du BAP…….....54

II.5 : Essais sur BAP……55
II.5.1 : Essais sur béton frais……55
A : Essai d'étalement (BAP) ……..…55
B : Essai de la boîte en « L »……..…….55
C : Essai de stabilité au tamis……..56
D : Essai d'entonnoir « V-Funnel »:……56
II.6 : Variables étudiées ……...……57
II.7. Conclusion……58

CHAPITRE3: RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1-Introduction……60
III.2-Etat frais……..……60
III.2.1Etalement……..……60
III.2.2 - Temps d'écoulement à travers V-Funnel»……61
III.2-3 la boîte en « L -.....62
III.2.4- stabilité au tamis ……..……63
III.3-Conclusion…….……65

CONCLUSION GÉNERALE ET RECOMMENDATIONS

Conclusion Générale……67
Recommandations……68

RÉFERANCES BILBIOGRAPHIQUES

Référence Bibliographique……79

Liste des tableaux

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

N° de tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Types de béton en fonction de leur destination	06
Tableau I.2	Types de béton en fonction de leur masse volumique	06
Tableau I.3	Types de béton en fonction de D_{max}	07
Tableau I.4	Types de béton en fonction de leur consistance	07
Tableau I.5	Classes de résistance à la compression	07
Tableau I.6	Les composantes du CPA	13
Tableau I.7	Les différents types du ciment	14
Tableau I.8	critère de stabilité	26

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET ESSAIS

N° de tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Propriétés physiques de ciment utilis	**44**
Tableau I.2	Caractéristiques physiques des fin de marbre utilisées.	**75**
Tableau I.3	Les caractéristiques de superplastifiant	**46**
Tableau I.4	Compositions des différents étudiés (pour $1m^3$ de béton) de BAP	**47**
Tableau I.5	Masse volumique apparent et absol des granulats	**51**
Tableau I.6	équivalent de sable	**52**
Tableau I.7	Résultats de l'absorption	**53**
Tableau I.8	Module de finesse des granulats	**53**

Liste des figures

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

N° de Figure	Titre	Page
Figure I.1	Composition d'un béton	05
Figure I.2	Mise en place sous son poids propre	09
Figure I.3	les granulats nagent à la surface sans aucune ségrégation	09
Figure I.4	Composition d'un BO et d'un BAP	10
Figure I.5	Le pont Akashi Kaikyo	11
Figure I.6	La tour Landmark Tower	11
Figure I.7	les Granulats utilisé dans le béton	12
Figure I.8	Les types de granulats selon leurs formes	12
Figure I.9	Ciment	13
Figure I.10	L'eau	15
Figure I.11	Défloculation des grains de ciment par le superplastifiant	16
Figure I.12	essai d'étalement	24
Figure I.13	boite en L	25
Figure I.14	Essai de la stabilité au tamis	26
Figure I.15	Essai d'entonnoir (V-Funnel)	27
Figure I.16	Essai du tube en U (U-Box)	28
Figure I.17	Essai J-Ring	28
Figure I.18	Essai de traction par flexion	30
Figure I.19	Effet du taux de poudre de marbre sur l'étalement	36
Figure I.20	Comparaison entre le temps d'écoulement de (BAPFC) et (BAPDM).	37
Figure I.21	Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la compression à différents âges.	38
Figure I.22	Résistance à la compression pour différents bétons	39
Figure I.23	Evolution de la résistance à la compression Comparaison en fonction du temps de(BAPFC) et (BAPDM).	40

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET ESSAIS

N° de Figure	Titre	Page
Figure II.1	le sable utilisée	**43**
Figure II.2	le gravier utilisé	**43**
Figure II.3	Le ciment utilisé	**44**
Figure II.4	Protocole d'obtention de déchets de marbre.	**45**
Figure II.5	Superplastifiant	**46**
Figure II.6	Protocol de l'essai d'analyse granulométrique	**48**
Figure II.7	les Courbes granulométriques des trois granulats utilisée	**49**
Figure II.8	Protocol de l'essai de La masse volumique apparente	**50**
Figure II.9	Protocol de l'essai de La masse volumique absolue	**50**
Figure II.10	Protocole de l'essai équivalent de sable	**52**
Figure II.11	Séquence de malaxage du béton autoplaçant	**54**
Figure II.12	Essai d'étalement	**55**
Figure II.13	Essai de la boîte en L	**55**
Figure II.14	Essai de stabilité au tamis	**56**
Figure II.15	V- funnel utilisé	**56**
Figure II.16	Variables étudiées	**57**

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATOPNS

N° de Figure	Titre	Page
Figure III.1	Etalement des BAP à base de poudre de marbre	**60**
Figure III.2	Temps d'écoulement T50 (sec) des BAP à base de poudre de marbre	**61**
Figure III.3	Temps d'écoulement des BAP à base de poudre de marbre	**62**
Figure III.4	Temps d'écoulement des BAP à base de poudre de marbre	**62**
Figure III.5	Indice de ségrégation des BAP à base de poudre de marbre	**63**

Notation et abréviation

BAP : Béton autoplaçant

E : des granulats quantité d'eau
E/C : Rapport eau sur ciment

$\boldsymbol{R_c}$ **:** Résistance à la compression

ES : Equivalent de sable à piston

S : Le sable

C : Ciment

G : Gravier

$\mathbf{P_p}$: Masse volumique apparente

$\mathbf{P_s}$: Masse volumique absolue

$\boldsymbol{f_{c28}}$ **:** Résistance à la compression à 28 jours

A : quantité d'air

A : quantité d'air

t : le temps d'écoulement

$\boldsymbol{M_f}$: Module de finesse

PH : potentiel hydrogène

ES : Equivalent de sable

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. La technologie du béton ne cesse dès lors de se compliquer. De nouveaux bétons sont ainsi apparus tels que les bétons à haute résistance, les bétons autoplaçants et les bétons recyclés.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir une mise en place aisée, un bon remplissage de coffrage.

Devant la complexité croissante des structures, formes variées, concentration d'armatures, les formulations de béton ont dû s'adapter, ce qui rend la mise en œuvre des bétons ordinaires très compliquée à ce types d`ouvrages avec des défaillances structurales très probables. Toutefois pour construire des structures durables et rigides il est nécessaire, de développer un béton de qualité afin de répondre aux exigences de la mise en place correcte et satisfaire au critère d`économie en introduisant des matériaux de recyclage**.**

Afin d`assurer des structures durables et uniformes et éviter les erreurs dues à la mise en place du béton, l`idée de produire les bétons fluides qui s`étalent dans les coffrages sans effort de vibration, c`est ainsi que le concept du béton autoplaçant a vu le jour.

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 plus nécessaire. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible avec l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants "superplastifiants ".

L`idée de produire des bétons autoplaçant a été lancée pour la première fois au Japon vers la fin des années 80.Depuis, l'utilisation de cette gamme de béton a été répandue de plus en plus partout dans le monde. En effet d'après son développement, le nombre d`ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants ne cesse d`augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est répondue dans le domaine de la construction**.**

Le béton autoplaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable. Il est capable de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport d'énergie extérieure (vibration). Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et permet ainsi la réalisation de formes compliquées ou d'ouvrages à densité d'armatures élevée tout en présentant généralement des surfaces de meilleure qualité**.**

Ce mémoire s'organise en deux grandes parties :

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique, en présentant les notions fondamentales de bétons autoplaçants, et le renforcement par des marbre, à savoir les propriétés des principaux types de marbre utilisées dans les domaines de la construction et aussi un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'ensemble des essais effectués au laboratoire, leur principe et leur mode opératoire. Caractérisant l'ouvrabilité des BAP à l'état frais, et les essais mécaniques (compression et traction) des BAP à l'état durci.

Dans le troisième chapitre, analyse et discute les résultats des différents essais réalisés.

Nous présentons des conclusions générales sur le Béton autoplaçant à base de marbre et leurs caractéristiques. En se basant sur les résultats obtenus, nous donnons quelques recommandations.

Enfin, nous espérons que ce travail apportera une contribution au développement et à la valorisation du marbre

Chapitre 1:
recherche Bibliographique

I .GENERALITES SUR LE BETON

I.1. Introduction

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration… Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers...[1]

I.2. Définition

I.3. Béton

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton [2]. Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

·d'une pate pure (ciment+eau),

·d'un mélange granulaire,

·de produits additionnels (adjuvants, additions minérales).

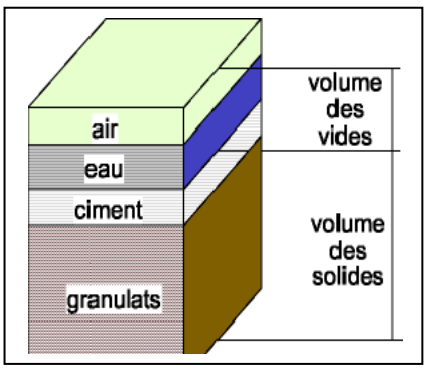


Figure I.1: Composition d'un béton

On désigne habituellement sous le nom :

·de matrice ou de mortier : le mélange (liant+sable+eau),

·de squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats .

I.4.Types de bétons

La classification des bétons se fait suivant différents critères, comme :

A. Leur destination [3]

Types de béton	Destination
Bétons compactés au rouleau	bétons spéciaux pour réaliser certain type de barrage (barrages poids).
Bétons projetés	Pour réaliser les travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés
Bétons de construction	destinés à la construction courante des bâtiments ou des ouvrages de faible importance
Bétons autonivelants (autoplaçants)	Pour les ouvrages présentant un ferraillage vraiment dense ou d'une forme variable difficile à mouler (courbures multiples).
Bétons coulables sous l'eau	Pour la construction ou la réparation des barrages, les structures portuaires, les tunnels
Bétons fibrés	Pour les dallages (fibres métalliques), piste d'aéroport ou d pièces techniques telles que les tuyaux, gaines (fibres de verre).

Tableau .1: Types de béton en fonction de leur destination [3]

B. Leur masse volumique

Selon la classification européenne, il y a trois classes de béton qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Types de béton	Béton léger	Béton normal	Béton lourd
Masse volumique (kg/m^3)	De 800 à 2000	De 2000 à 2600.	Supérieure à 2600

Tableau 2. Types de béton en fonction de leur masse volumique [4]

C. Leur granularité

La classification se fait en fonction de la dimension maximale des

Granulats D_{max} :

Classes du béton	Béton fin	Béton moyen	Béton gros
Dimension maximale de granulats D_{max}	$8 \leq D_{max} < 16$mm	$16 \leq D_{max} < 31.5$ mm.	$31.5 \leq D_{max} < 63$

Tableau 3: Types de béton en fonction de D_{max} [5]

D. Leur consistance (cône d'Abrams)

Elle est définie en utilisant le cône d'Abrams, et on obtient les cinq classes suivantes :

Affaissement (Aff.) en cr	Classe des bétons
0 à 2	Très ferme
3 à 5	ferme
6 à 9	plastique
10 à 13	mou
>14	Très mou

Tableau 4: Types de béton en fonction de leur consistance [6]

E . Leur résistance à la compression

La norme EN-206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau 5.Dans ce tableau f_{ck-cyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'eurocadre 2) ; $f_{ck-cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

Classes	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 45/55
f_{ck-cyl} (N/mm^2)	8	12	16	20	25	30	35	45
$f_{ck-cube}$ (N/mm^2)	10	15	20	25	30	37	45	55

Tableau 5: Classes de résistance à la compression [7]

I.5. les bétons autoplaçants

I.5. 1. Introduction

Les maitres 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 « superplastifiant ». Le béton autoplaçant 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-compaction concrète (SCC, en Anglais).

·Béton hyper fluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP) **[8].**

I.5. 2. Définition du BAP

Le béton autoplaçant est défini comme suit dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1 : Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation**.**

Ce sont des bétons très fluides, la caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sans vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes .Grâce à leurs bonne uniformité une fois mis en place, ils donnent des structures résistantes et durables **[9].**

La figure (2) montre une comparaison entre la mise en place d'un béton traditionnel et d'un BAP.

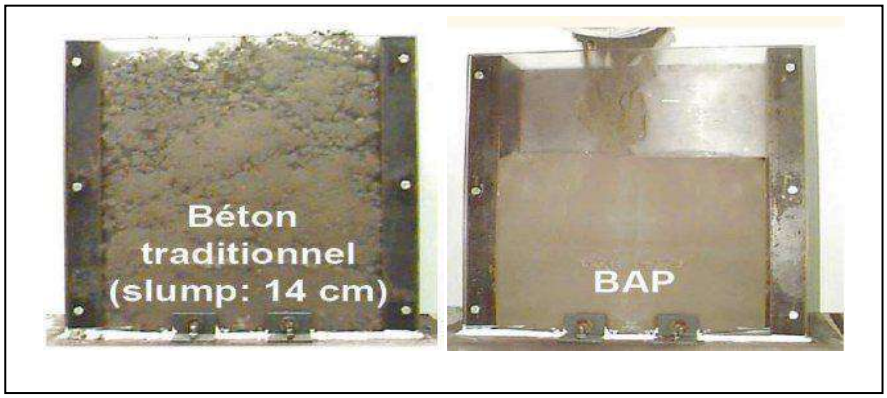


Figure I. 2 : **Mise en place sous son poids propre [10]**

Ces propriétés peuvent être obtenues par l'emploi de superplastifiant et un volume de fines convenables**.**

Les BAP se distinguent donc des bétons ordinaires, ou bétons à vibrer, par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment+sables+eau+adjuvant+fines) plus élevée que les bétons ordinaires, ils se caractérisent aussi par une quantité de fines élevée et l'emploi de superplastifiant. Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés rétenteurs d'eau ou agents de viscosité, entre également parfois dans leurs formulation. Ces derniers vont donner de la viscosité à la pâte, pour lui conférer un certain nombre de propriétés qui visent à limiter la résistance à la ségrégation (figure 2) **[11].**



Figure I. 3 : **les granulats nagent à la surface sans aucune ségrégation.[12]**

Ce sont ses propriétés à l'état frais qui distinguent essentiellement les BAP des BO.

Les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leurs cas, la pâte définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition (ciment+eau efficace +air occlus+addition), est privilégié au détriment des gravillons (voir la figure 3) En générale, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépondent de la méthode de formulation choisie **[13].**

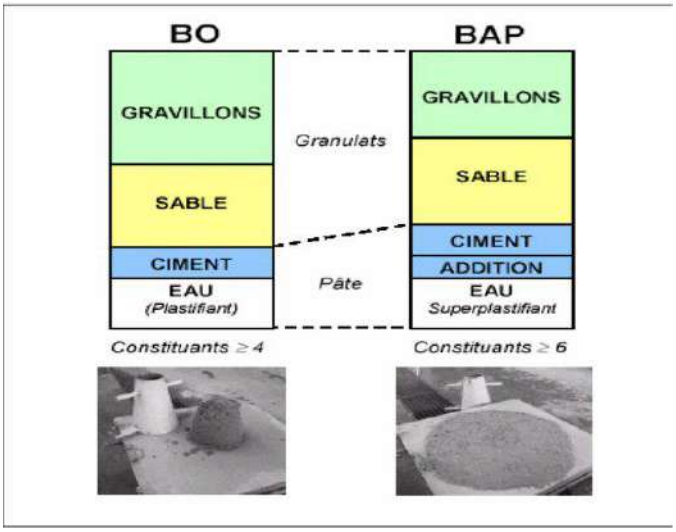


Figure I. 4 : **Composition d'un BO et d'un BAP. [13]**

La formulation de ce type de bétons n'est pas aussi simple que dans le cas des bétons ordinaires car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires : la fluidité et la stabilité **[14]**

I.5. 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 **[15].** 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 ferraillage importantes ;

– formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;

– voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, … ;

– voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;

– exigences architecturales et qualité de parement particulière.

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

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

les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994) .



Figure I. 5: Le pont Akashi Kaikyo .

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



Figure I. 6: La tour Landmark Tower .

I.5.4. Les différents constituants des BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique chimique, et morphologique. Ainsi, nous allons décrire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents. Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. En effet, si l'un de ces constituants n'est pas présent, le béton n'existerait pas. Les bétons autoplaçants par contre, sont possibles grâce aux ajouts d'adjuvants
et d'additions minérales à la composition de base du béton **[16.17].**

- Granulats



Gravier



Sable

Figure I. 7 : les Granulats utilisé dans le béton

Sables, graviers ou cailloux constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis à- vis du ciment. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats

à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive **[18].**

Selon leurs origine on distingue des granulats roulés, extrait de ballastière(ou sablière) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir des roches exploités en carrière **[19].**

Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « agrégats ».Il sont compris entre 0 et 125 mm **[14].**

Voici deux types de granulats (Roulés et concassés) selon la forme :



Granulats roulés.



Granulats concassés.

Figure I. 8: Les types de granulats selon leurs formes

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment.

-le Ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile à 1450°C. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air

ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique Un composant majeur du clinker **[19].**

C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.



Figure I. 9 : Ciment

***Les principaux constituants du ciment portland**

Sont énumérés dans le tableau 3 Avec leur symbole abrégé. En effet cette notion abrégée, utilisée par les chimistes de l'industrie du ciment décrit chaque oxyde par une lettre.

Composé	Composition	Abréviation
-Le silicate tricalcique	3CaOSiO2	C3S
-Le silicate bi calcique	2CaOSiO2	C2S
-L'aluminate tricalcique	3CaOSiO2	C3A
-Le ferroaluminate tetracalcique	4CaOAl2O3Fe2O2	C4AF

Tableau I. 6 : Les composantes du CPA [20]

***Les différents types du ciment**

En principe tous les ciments conformes à la norme SN EN 197-1 conviennent pour la fabrication de béton BAP. Les exigences particulières de fluidité du BAP imposent un dosage en pâte de ciment très élevé, raison pour laquelle ce béton comprend en général aussi des additions minérales. La plupart du temps, il s'agit de cendre volante siliceuse selon SN EN 450 ou de farines inertes de quartz ou de calcaire. A cet égard, la cendre volante a un effet favorable, puisqu'elle permet généralement d'abaisser le rapport eau sur ciment E/C. Les hautes exigences requises pour un BAP ont conduit au développement de ciments Portland composés spécialement adapté à la fabrication sûre et stable du BAP **[20].**

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés, des fumées de silice **[19].**

Dans le but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capable de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques. **[21]**

Selon leurs teneurs en clinker et les autres constituants les différents types du ciment sont définis dans Le tableau 4 ci-dessous qui donne les teneurs en pourcentage de ces constituants.

Désignations	**Types de Ciment**	**Teneur en Clinker**	**Teneur En % des autres constituan**
CPA-CEM1	Ciment portland	95 à 100%	
CPJ- CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94%	-de 6 à 20% de l'un quelconque des constituants, Sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%
CPJ-CEM II/B		65 à 79%	-de 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus
CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	Ciment de haut-fourneau	35 à 64% 20 à 34% 5 à 19%	-36 à 65%de laitier haut-fourneau -66 à 80%de laitier haut-fourneau -81 à 95%de laitier haut-fourneau
CPZ-CEM IV/A CPZ-CEM IV/B	Ciment Pouzzolanique	65 à 90% 45 à 64%	-10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silic ces derniers étant limités à 10%. -36 à 55 % comme ci –dessus
CLC-CEM V/A -CLC-CEM V/B	Ciment au laitier aux cendres	40 à 64% -20 à 39%	-18 à 30% de laitier de haut-fourneau 18 à30 % de cendres siliceuses ou d pouzzolanes -31 à50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus

Tableau I. 7 : Les différents types du ciment [19]

***L'eau de gâchage**

Le dosage en eau est un facteur très important de la Composition du béton, on bien l'influence qu'il a sur la propriété du béton par les vides créés, lorsque L'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats) **[14].**

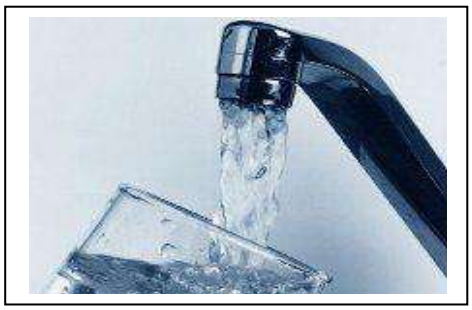


Figure 10:L'eau

Ce constituant peut en influencer la qualité du béton, en fonction de sa qualité et quantité pour cela il ne doit pas contenir de matière de suspension au-delà des tolérances règlementaires : **[19]**

- 2g/l pour les bétons à haute résistance,
- 5g/l pour les bétons à faible résistance.

L'eau introduite lors du gâchage remplit deux fonctions **[19]:**

- l'une physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide ;
- et l'autre chimique qui contribue au développement de la réaction dite d'hydratation.

***L'emploi de superplastifiant**

Un superplastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, permet de réduire le dosage en eau et d'ajuster sa fluidité (augmenter l'affaissement au cône d'Abrams), ceci entraîne une augmentation de la résistance mécanique **[20].**

***Mode d'action des superplastifiants**

Les (super)réducteurs d'eau ou (super)plastifiants) sont des molécules polaires qui présentent une extrémité fortement chargée, qui vient neutraliser un site opposé sur les grains de ciment. Généralement, les grains de ciment anhydres sont chargés électriquement à leur surface, du fait de la rupture de liaisons électriques entre les cations et les anions pendant le broyage **[18]**. Il est observé que les grains de ciment anhydres sont plus chargés négativement que positivement à la sortie des broyeurs.

Il existe une certaine cohésion entre les grains de ciment qui les maintient « collés » les uns aux autres formants des flocs. Cette cohésion est associée à des phénomènes d'attraction électrique entre plages de signes différents à la surface des grains ainsi qu'à des forces moins spécifiques dites de Van Der Waals **[16].**

Les polymères viennent alors s'adsorber sur les surfaces chargées et dispersent les flocs de ciment. Le défloculant ajouté en quantité non négligeable libère les particules de ciment entre elles en cassant les forces capillaires dans le cas de formation de ménisques d'eau ou les forces électrostatiques de Van der Waals dans le cas de flocs formés à partir des charges électriques des particules de ciment. Celui-ci permet ainsi de supprimer un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment. **[10]**

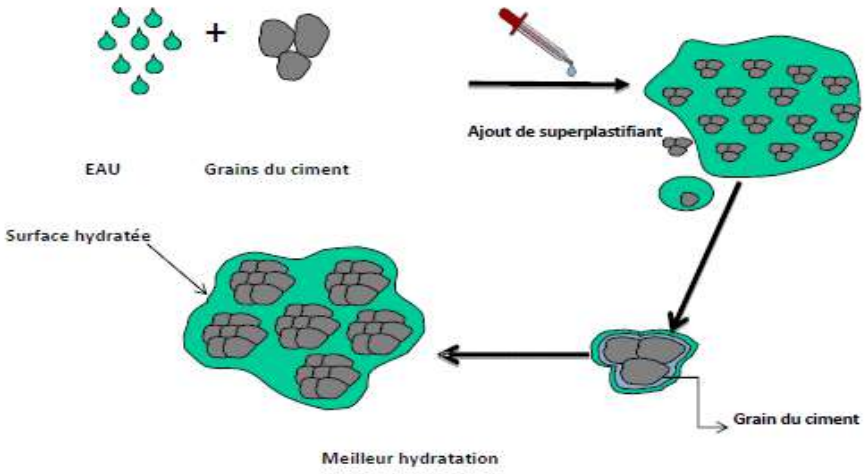


Figure I. 11 : Défloculation des grains de ciment par le superplastifiant [10]

Lors de l'ajout du superplastifiant

Les molécules du superplastifiant agissent sur les particules du mélange en s'adsorbant à leurs surfaces, et en réduisant les forces de Van Der Waals, une fois ces forces diminuées les particules sont défloculées **[12].**

Dans le cas où les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient l'état de charge des surfaces des particules et donc les forces de double couche électrique.

*L'agent de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais à tendance à réduire sa viscosité, le matériau devient alors moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. Pour minimiser cet effet l'ajout d'un agent de viscosité s'avère nécessaire **[23].**

Les agents viscoses sont des polymères qui ont été développées pour éviter le « délavement »à l'état frais des bétons coulés sous l'eau. Ils sont de différentes natures et peuvent être classés selon 3 catégories en fonction de leurs mécanismes d'action **[24].**

-**Adsorption** : La longue chaîne de polymère adhère à la périphérie des molécules d'eau. Cela a pour effet d'adsorber et de fixer une partie de l'eau d'ajout. Il y a augmentation de la viscosité de l'eau d'ajout et donc de la pâte de ciment **[24].**

- **Association** : Les molécules au contact de la chaîne de polymère développent des forces d'attraction. Le mouvement de l'eau est ainsi bloqué par la création d'un gel et sa viscosité est augmentée **[24].**

- **Entrelacement** : Pour un faible taux de cisaillement et particulièrement pour une forte concentration, la chaîne des polymères peut s'entrelacer et s'enchevêtrer ce qui augmente la viscosité apparente. L'enchevêtrement peut se délier lorsque la vitesse de cisaillement augmente. La chaîne de polymère s'oriente alors dans le sens de l'écoulement ce qui diminue la viscosité apparente **[24].**

Les additions minérales

Le béton autoplaçant requiert souvent pour l'amélioration de ses propriétés rhéologiques, l'addition de particules fines inertes ou réactives, qui régulent aussi la quantité de ciment dans la formulation et réduisent ainsi la chaleur d'hydratation cause d'un fort retrait **[10].**

Ce sont des produits de dimension granulaire inférieure à 80µm, obtenus par broyage fin, récupération des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, silice, etc.) **[10].**

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

- **Avantages économiques et écologiques :**

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans

le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature **[25.26].**

- **Avantages techniques**

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique **[12].**

***Classification des additions**

A) Les fillers

Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcites finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbes granulométriques utilisés aussi pour augmenter la quantité de fines. La

taille dans une gamme inférieure à 0,125mm sera un très grand avantage **[10].**

Il est à noter que la dolomite peut présenter des problèmes de durabilité à cause de la réaction alcali - carbonate. Le filler calcaire intervient dans la rhéologie des pâtes de ciment par sa granularité et sa réactivité chimique. Il forme avec la pâte de ciment une liaison qui améliore les résistances mécaniques par comparaison à l'effet d'un filler inerte comme le quartz. Cette liaison peut être renforcée par l'utilisation de fillers mixtes (calcaire + silice réactive) ou de rapports eau/ciment plus faibles **[18].**

B) Les fumées de silice

Selon la norme NF P 18-502 « fumées de silice » : il s'agit de : Poudre amorphe divisée résultant de la production d'alliages de silicium. Elle est entraînée par les gaz, depuis la zone de combustion des fours, vers le système de captage. La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium métallique ou des différents ferroalliages contenant du silicium (comme : FeSi, CaSi) Lors de la réduction du quartz en silicium dans un four à 2000 °C il y a production des vapeurs de SiO, au moment de leur passage par les partie les plus froides du four et dès leur contact avec l'air, ces vapeurs s'oxydent et se condensent sous forme de microsphères de silice. Selon la norme, on distingue deux classes A et B les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et les plus fines. Compte tenu de leur très grande finesse et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, la proportion des fumées de

silices est limitée à10% du poids de ciment. Leur emploi est réservé aux bétons contenant un superplastifiant **[18].**

C) Cendres volantes

Les cendres volantes sont conformes à la norme EN 450. Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion, en centrale thermique, de minéraux solides. C'est un matériau inorganique fin qui a des propriétés pouzzolanique à long terme. La cendre volante silico-alumineuse (classe F) est principalement vitreuse. Elle peut contenir des phases cristallisées comme le quartz, la mullite, la gehlénite, des spinelles Pouzzolanique, Elle met du temps à réagir. Sa combinaison avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment commence à 28 jours. Ainsi, l'ajout de cendre volante réduit le risque de fissuration due à l'élévation de température lors de l'hydratation du ciment. Plusieurs recherches ont montré que l'usage de cendre volante dans les BAP améliore les propriétés rhéologiques et donc réduit le dosage en superplastifiant utile à l'obtention d'un étalement similaire à celui d'un BAP sans ajouts **[10].**

D) Le laitier de haut fourneau

C'est un coproduit de la production de la fonte. Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au-dessus de la fonte, et se vitrifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier (à environ 400 m²/kg à 500 m² /kg) donne ce qu'on appelle le laitier vitrifié moulu. Il est utilisé comme ajout cimentaire s'il est conforme à la norme : NF P 18-506 «Additions pour béton hydraulique. Laitier vitrifié moulu de haut fourneau». La composition chimique du laitier est relativement constante, car pour permettre le refroidissement de la fonte la composition chimique des matières premières doit être bien ajustée. Tandis que sa composition minéralogique dépend de son mode de refroidissement, un laitier est d'autant plus vitreux que le refroidissement est rapide **[14].**

E) Métakaolin (**MK) [26]**

Le métakaolin (MK) est une addition minérale (classée ultrafine) possédant des propriétés pouzzolanique. Cette pouzzolane est obtenue par la calcination d'argile, la kaolinite, dont la pureté en kaolin est importante. Après l'évaporation de l'eau adsorbée entre les feuillets d'argile (T > 100°C), la phase de dés hydroxylation (perte des groupements hydroxyles liés physiquement aux feuillets d'argile qui se produit entre 700 et 800°C) entraine une destruction de la structure cristalline du kaolin qui ne recristallise pas. Le traitement thermique entraine donc le passage d'une phase cristallisée et ordonnée

I.6. Formulations des BAPs

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée.

Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis **[28].**

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP. Il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et quelques de ses modifications.

I.6.1. Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, d'après Ozawa et al rapporté par **[28].**

Cette méthode 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. Le principe de cette méthode est le suivant:

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés:

$$G = \frac{50}{100} G_{lim} (1 - A) \qquad \textbf{(II.2)}$$

Où:

A : quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} : volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier

Où:

$$S = \frac{40}{100}\frac{(1-A-G)}{(1-k_{sf})} \quad \textbf{(II.3)}$$

k_{sf}: taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%

L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs: étalement relatif et vitesse relative d'écoulement

- La fluidité du mortier, donnée par:

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \quad \textbf{(II.4)}$$

Avec ;

D : est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône.

- La viscosité du mortier, donnée par:

$$T = \frac{10}{t} \quad \textbf{(II.5)}$$

Avec ;

t : le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de D est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de Test faible, plus la viscosité est élevée).

Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément :

$$D=5 \text{ et } T=1\pm0.1 \quad \text{(II.6)}$$

Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

I.6.2. Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par Sedran et De Larrard **[29]** est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. 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 **[30]-[31]**, et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants).Pour un béton autoplaçant, les grandeurs exigées à l'état frais sont :

- Un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm
- Un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa
- Une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (grandeurs rhéologiques mesurées au BTHREOM).

Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas déségrégation. Une proportion de liant (ciment + addition) est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé. Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée.

I.6.3. Formulation CBI modifiée

La principale modification et extension de la méthode CBI est apportée par Bui et al dans **[32],** qui ont proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats.

Leur méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de la pâte autour des granulats du béton autoplaçant, grâce à une base de données importante de formulations de bétons **[33].** L'espacement moyen entre les particules varie selon les auteurs entre 0,3 et 1 mm.

I.6.4. Formulation JSCE

La démarche proposée en 1998 par la Japanese Society of Civil Engainées (JSCE) est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques. Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont **[34]:**

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'auto compactibilité désirée. Il est situé entre 0.30 et 0.32 m3/m3 et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.
- Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 kg/m3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par m3. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m3.
- Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre85 et 115% en volume.
- La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5%d'air.
- Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en général0.13m3/m3. Dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre0.16 et 0.19 m3/m3.
- La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau et air).
- Le dosage de superplastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de superplastifiant dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les superplastifiants de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par m3, ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres.
- Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

I.7. 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 des vérifier les différentes propriétés citées ci dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton de part sa fluidité, sa stabilité et son absence au blocage. Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité qui caractérisent les bétons autoplaçants.

I.7. 1. Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams) :

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant d'évaluer la fluidité est l'essai d'étalement réalisé avec le cône d'Abrams. Le principe de cet essai est de mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône **(figure I.12)** [**35**].

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre caractérisant de la fluidité, plus il est grand, plus le béton est fluide (grande capacité de remplissage). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50cm et 80cm en fonction de l'utilisation du béton [**36-37**].

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

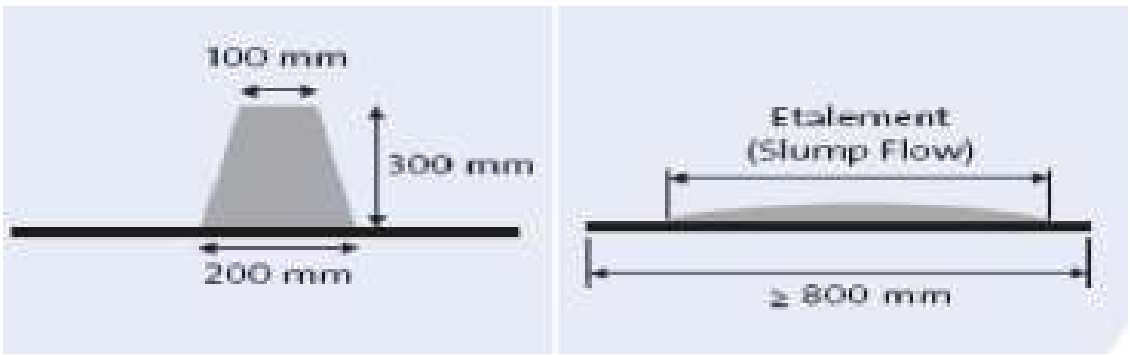


Figure I.12 : essai d'étalement

I.7. 2. Mesure du Temps d'Ecoulement T50 (Essais au cône d'Abrams)

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

secondes [**38-39**]. Cependant, certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes, pour des bétons autoplaçants avec une faible vitesse de déformation [**40-41**].

I.7. 3. Essai de Ségrégation dynamique (Essai de Boite 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.18), est de remplir entièrement la partie verticale de la boite, laisser le béton se reposer 1 mn puis enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers le ferraillage. 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 ferraillage standard pour des ouvrages de génie civil très ferraillés. Selon le groupe association française de génie civil AFGC **[34]**, le taux de remplissage doit être supérieur à 0,8.

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

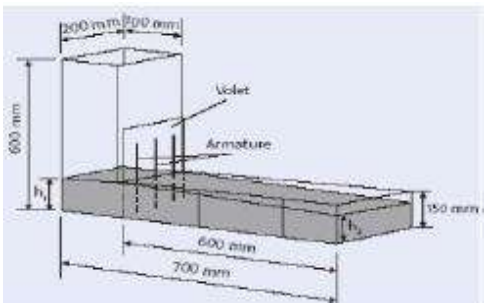


Figure I.13: boite en L.

I.7. 4. Essais de ségrégation statique (Essai de 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.19). 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 **[35]**.



Figure I.14: Essai de la stabilité au tamis.

Conditions	Critères de stabilité	Remarques
0%P 15%	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
0%P 15%	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilit
0%P 15%	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

Tableau I.8 : critère de stabilité

I.7. 5. Essai d'entonnoir (V-Funnel) :

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en forme de V : V-Funnel) montré dans la (Figure II.5), ou parfois un entonnoir à section circulaire (O-Funnel).

Le V-funnel est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton.

Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue.

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

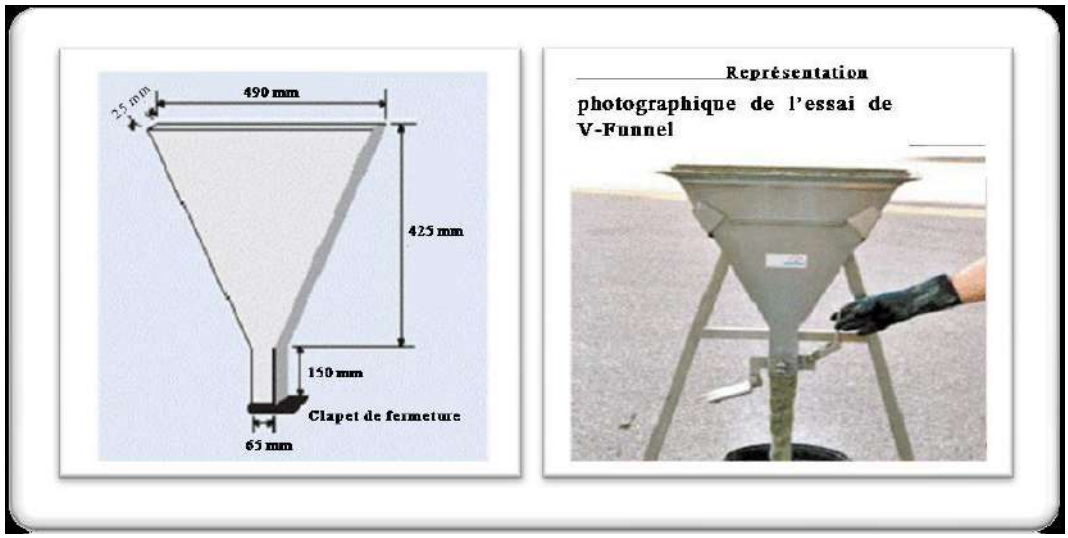


Figure I.15 : Essai d'entonnoir (V-Funnel)

I.7. 6.Essai de la boite en U (U-Box)

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai**(Figure I. 16)** est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante.

Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

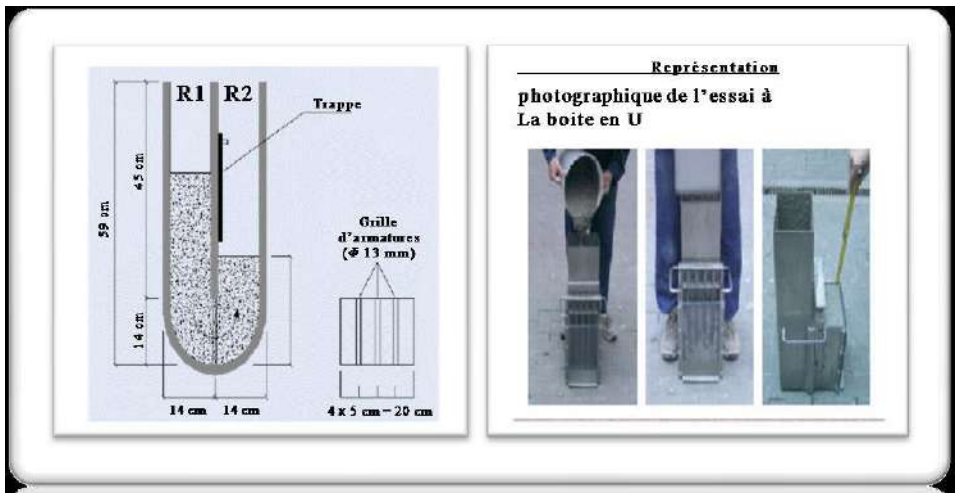


Figure II.16: Essai du tube en U (U-Box)

I.7. 7.Essai de la couronne J (J-Ring)

L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abrams. L'anneau d'armatures et le cône d'Abrams **(Figure. I. 17)** sont centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures.

Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre les armatures sont différentes selon les auteurs et les pays. Nous citons quelques dimensions rapportées par

- Les diamètres des armatures et les espacements entre armatures peuvent varier respectivement dans les plages 10-16 mm et 34-48 mm.
- Le diamètre de l'anneau varie entre 23.5 et 30 cm.

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué deux fois, la deuxième fois en utilisant l'anneau d'armatures.

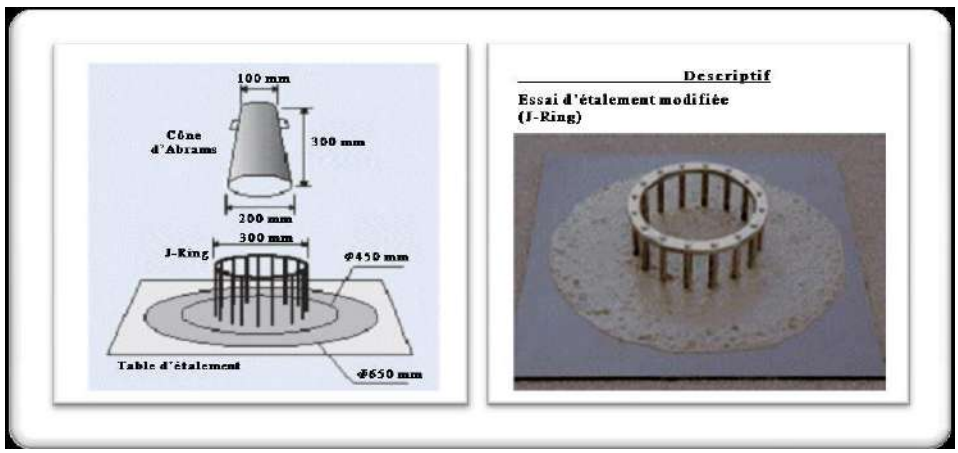


Figure I.17 : Essai J-Ring

I.8. Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

• La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.

• Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.

• Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.

• Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

I.8.1. Résistance à la compression [42]

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f c28. La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{fc = F/Ac}$$

où :

- fc: résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés)
- F : charge maximale, exprimée en Newtons ;
- Ac : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm^2) près.

I.8.2. Resistance à la traction par flexion [43]

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée. **[44]** Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$f_{tj} = 1.8P/ a^2$$

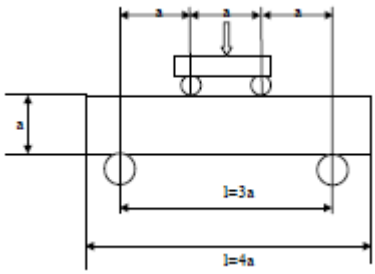


Figure I.18. Essai de traction par flexion

I.9. Les Avantages et inconvénients des BAP

Les BAP présentent de nombreux avantages : **[45]**

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

Comme inconvénients, on distingue

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

l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants **[46].**

I.10. Recyclage des déchets

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités.

Le terme déchets désigne toutes substances mise en rebut, ou tout produit qui doit être jeté car il est usé, contaminé ou abîmé **[47].**

Le recyclage est le procédé de traitement des différents types de déchets et des sous-produits.

Il constitue une activité importante dans les pays développés.

Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques: la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.

Plusieurs types de résidus, sous produits et déchets divers peuvent être utilisés en fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés comme granulats.

Parmi les divers matériaux on trouve, les laitiers, le béton récupéré, la brique concassé, les déchets de centrales thermiques (cendres volantes), les déchets provenant d'exploitation des mines, et les déchets de marbre.

I.11. Marbre et déchets de marbre

I.11.1. Historique [48]

L'Histoire du marbre date de très longtemps. L'utilisation du marbre dans l'architecture remonte à des milliers d'années pour les anciennes cultures égyptiennes et mésopotamiennes. Capable de supporter un poids immense, le marbre a été idéal pour les colonnes monolithiques et structures d'appui dans les bâtiments publics, prives et religieux.

De la salle rouge richement colorée de la basilique de Saint-Paul à Rome aux murs du palais de Versailles, à la nef richement conçue de Salisbury Cathédrale de l'Angleterre, le marbre a été utilisé dans certains des bâtiments les plus impressionnants du monde. Le Trésor des Athéniens, construite au VIe siècle avant JC, a été le premier bâtiment construit entièrement en marbre. Le

Parthénon, érigé par Périclès dans la même période, a été construit pour être le phare de l'Acropole.

Le Parthénon est encore aujourd'hui, témoigne de la résistance de l'un des matériaux de construction les plus luxueux du monde.

L'histoire du marbre a aussi une signification. Le mot ≪marbre≫ provient du grec, marmaros, ce qui signifie « Neige pierre blanche et sans tache ». Et parce qu'aucune autre pierre n'offre le raffinement du marbre, il a été utilise par les plus grands sculpteurs du monde.

Le plus célèbre, Michel-Ange, « David ≫ sculpte à partir d'un seul bloc de marbre.

Les architectes ont également profité des caractéristiques uniques du marbre, les détails iconographiques sont intégrés ainsi que des portraits de marbre dans la conception du bâtiment.

Les technologies modernes ont permis aux concepteurs de profiter de la beauté et de l'élégance du marbre sans être pénalisé par un coût élevé. Aujourd'hui le marbre est fabriqué à un prix abordable et en masse.

I.11.2. Définition des marbres [48]

En géologie le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée Principalement de cristaux de calcite. En architecture, sculpture et marbrerie ce terme peut désigner n'importe quelle pierre difficile à tailler et capable de prendre un beau poli, dont les plus courantes sont les « vrais » marbres.

Le marbre est classé selon son type et son type varie de pierre en pierre. Il existe trois Classifications de marbre : la Dolomite, le Magnésium et la Calcite.

- la Dolomite contient plus de 40% de carbonate de magnésium.
- le Magnésium contient entre 5% et 40% de magnésium.
- la Calcite contient moins de 5% de carbonate de magnésium.

I.11.3. Types de marbre [49]

Les différents types de marbre qu'on peut trouver :

a) Marbre Algériens :

- **Marbre blanc - marbre gris - marbre reseda vert** : carrière de marbre de Fil-Fila
- **Marbre rouge - marbre jaune et rose** : gisement de marbre de Krystel
- **Marbre Mahouna** : la carrière de marbre de Mahouna
- **Marbre onyx dore** : filon d'onyx de Ain Smara
- **Marbre onyx jaune** : carrière de Bouhnifia

- **Travertin** : carrière de Sidi M'barek
- **Tarbre blanc et vert** : carrière de Honaine (Tlemcen).

b) Marbre de Portugal

- **Marbre de Lisbonne :** couleur rougeâtre, avec des débris de coraux et fossile de couleur blanchâtre.
- **Marbre de Vila Viçosa** : dans l'Alentejo moucheté gris.
- **Marbre de Troncao** : jaune pâle veiné gris.

c) Marbre de Russie :

- **Marbre de l'Oural** : les monts de l'Oural fournissent les marbres les plus varies. La plupart se tient dans la région de Iekaterinbourg pour les monuments de Saint-Pétersbourg et d'ailleurs que Catherine de Russie fit construire, comme le Palais de Marbre (Saint-Pétersbourg).

I.11.4. Mode de Fabrication

1) L'extraction [49]

Les blocs de marbres étaient autrefois extraits avec des pics et des coins.

À partir du 19*è* siècle, le découpage des blocs de marbre se fait par le passage d'un fil hélicoïdal qui entraîne dans sa course de l'eau qui le refroidit et du sable qui sert d'abrasif. Il est guidé par des poulies, et actionné par un moteur. Plus tard, le fil est muni de fragments de diamant.

2) Le bardage [49]

3) Le sciage et l'usinage [49]

Fin 18*è* siècle, la scie de marbrier consiste en une lame de fer doux sans dents, droite et unie dans sa monture, servant à débiter les marbres en tranches en y versant du grès pilé et de l'eau dans la voie que fait la scie pour traverser le bloc.

Une usine désigne une machine composée de roues que l'eau fait tourner et qui fait mouvoir plusieurs fers de scie pour débiter en branches les blocs de marbre. Les usines sont aussi appelée châssis pourront être équipées de jusqu'à 100 lames et seront actionnées par la suite par des moteurs Plus tard des scies circulaires seront utilisées.

4) Le polissage [49]

Après le sciage, la dalle de marbre est polie. Cette opération se fait fin 18*è* siècle par les polisseurs, de la manière suivante: Les blocs de marbre sont égrisés. Première opération du poli des marbres qui sert à faire disparaitre le brut de la scie ou du ciseau, on l'exécute en frottant la

surface du marbre avec un morceau de grès ou un fer, sous lesquels on met du grès pilé et de l'eau.

Le marbre est ensuite rabattu, c'est-à-dire qu'on le frotte avec des morceaux de faïence non émaillés, du sable doux et de l'eau ; c'est la seconde opération du polissage, et que l'on nomme rabat dur. Après avoir mastiqué on donne le rabat doux ; cette opération consiste à faire usage pour molette, de pierre de Gotland au lieu de faïence et de terre à four, puis de la pierre-ponce réduite en poudre et mêlée avec de l'eau. Le masticage des fils, cavités ou terrasses qui se rencontrent dans le marbre est la troisième du poli. On adoucit ou doucit le marbre - C'est-à-dire que l'on frotte le marbre avec une pierre-ponce dure et de l'eau; c'est la quatrième opération employée pour parvenir au poli du marbre. Le marbre est ensuite piqué - La cinquième opération que l'on exécute pour le poli: elle consiste à frotter avec un bouchon de linge fin humecté d'eau.

Le marbre est ensuite relevé ou lustré, la dernière opération du poli, pour rendre la surface du marbre luisante et réfrangible aux rayons de la lumière: elle s'exécute au moyen d'un bouchon de linge humecté d'eau, ensuite d'un autre non humecté, avec lesquels on frotte sur la surface de la matière en y ajoutant de la potée réduite en poudre. Au $21^{ème}$ siècle, le polissage se fait par meulages successifs au moyen de meules tournantes horizontales. La grenaille d'acier, le carbure de silicium ou le carbure de bore, l'électrocorindon, et les diamants naturels ou artificiels sont les produits abrasifs couramment utilisés. Des produits chimiques tels l'acide sulfurique ou le sel d'oseille, peuvent par ailleurs être ajoutés à la poudre abrasive.

5) La pose [49]

Au $18^{ème}$ siècle, les tranches de pierre ou de marbre sont taillées en carreau/morceaux de diverses grandeurs, de forme carrée, octogone ou losange, qui se posent au sol de différentes pièces, comme salles à manger, vestibules, paliers d'escaliers, etc. ; les carreaux de compartiment sont des carreaux en marbre de différentes formes et couleurs. Le travail se fait à la sciotte.

Les plaques définitives sont éventuellement moulurées.

La cire à cacheter sert à mastiquer les marbres filardeux et à rejoindre les éclats qui peuvent se faire dans la taille des moulures ou autres.

Les pièces de marbre sont assemblées à chaud par des goujons, agrafes et pattes de fixation ou maçonnées au plâtre. Les goujons et agrafes de fer sont graissés, c'est-à-dire enduits de mastic, pour empêcher l'oxydation d'une part et d'autre part augmenter la cohésion entre les pièces métalliques et le marbre

I.11.5. Caractéristiques et Propriétés de marbre [49]

La sensation de froid que l'on a en touchant du marbre, bien qu'étant à la température ambiante, est due à sa forte effusivité thermique.

I.11.6-Valorisation des déchets de marbre dans le béton autoplaçant

*Sur Béton autoplaçant

I.11.6. 1. Etat frais

Haddadou.N **[50]** montre que les meilleurs étalements sont obtenus pour les BAP qui renferment une quantité de poudre de marbre élèves. Ceci confirme l'action bénéfique du déchet industrielle (PM) vis-à-vis de la fluidité et bien sur l'effet du superplastifiant utilises pour minimiser le frottement inter granulaire.

De cette figure, on remarque que l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une augmentation de la déformabilité du BAP, ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement. La meilleure déformabilité a été obtenue avec une teneur en PM de 30%.

Les valeurs obtenues varient entre 63 et 73 cm, ce qui permet de conclure que, toutes les BAP sont a l'intérieur de la fourchette ciblée 60÷80cm [AFGC 2008]. Ces résultats témoignent de l'effet positif de l'utilisation de la PM dans l'objectif d'améliorer la déformabilité des BAP.

L'augmentation de la déformabilité peut être due aussi a la finesse de la poudre de marbre qui est plus grande que celle du ciment. Cette finesse, qui améliore la granulométrie et la compacité, contribue de manière significative a l'amélioration de la rhéologie et la stabilité des bétons **[51,52].** L'augmentation du volume de la pate (en raison de la faible densité de la PM par rapport au ciment) permet d'écarter les particules des granulats les unes des autres conduisant à une diminution des frottements inter granulaires **[53].** En conséquence, la résistance a l'écoulement devient plus faible, et la déformabilité devient plus grande.

L'augmentation du volume de la pate contribue non seulement a l'amélioration de la déformabilité, mais aussi l'ouvrabilité, la plasticité et l'homogénéité des BAP **[53].** La substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une diminution de la quantité d'eau consommée par les réactions d'hydratation, ce qui résulte une quantité d'eau libre plus grande, raison pour laquelle la déformabilité augmente

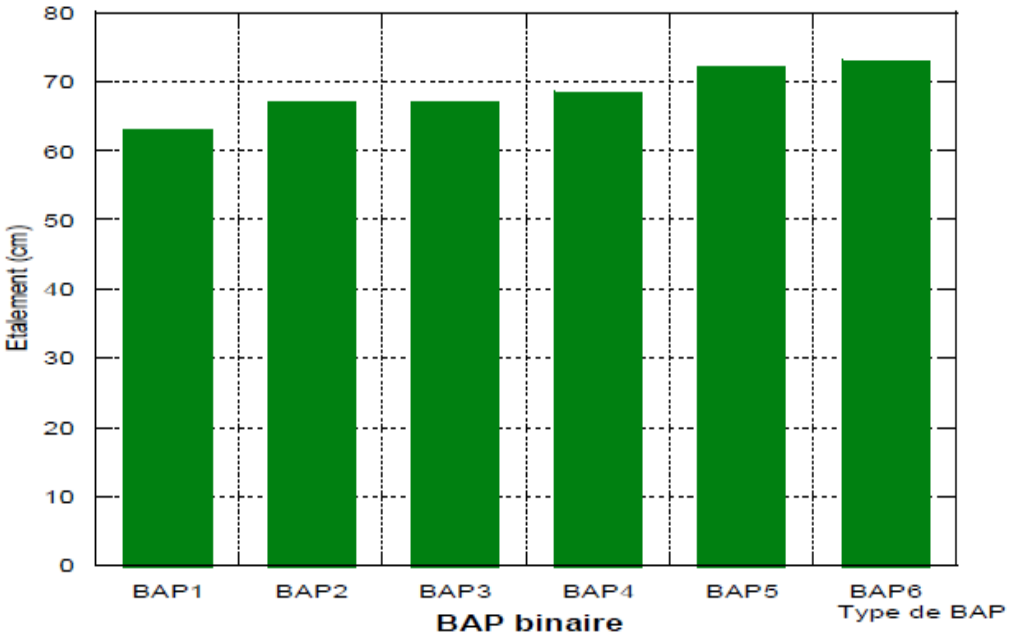


Figure I.19 : Effet du taux de poudre de marbre sur l'étalement.

CHIBANI.N et HOUARI.H **[55]** ont trouve que Le temps d'écoulement mesure par l'entonnoir est (24,75s) ci concerne le béton (BAPDM), donc cela peut être considère comme satisfaisant et à la limite du domaine de la spécificité autobloquante.

Ils ont remarqué sur l'histogramme de la (**Figure I.20)** que le temps d'écoulement de béton (BAPDM) est plus élevé de (60%) que celui de béton (BAPFC). Donc les fillers calcaires peuvent avoir une influence sur la fluidité des BAP par rapport aux fines des déchets de marbre, en d'autres termes, ces fines des Déchets de marbre freinent l'écoulement de béton

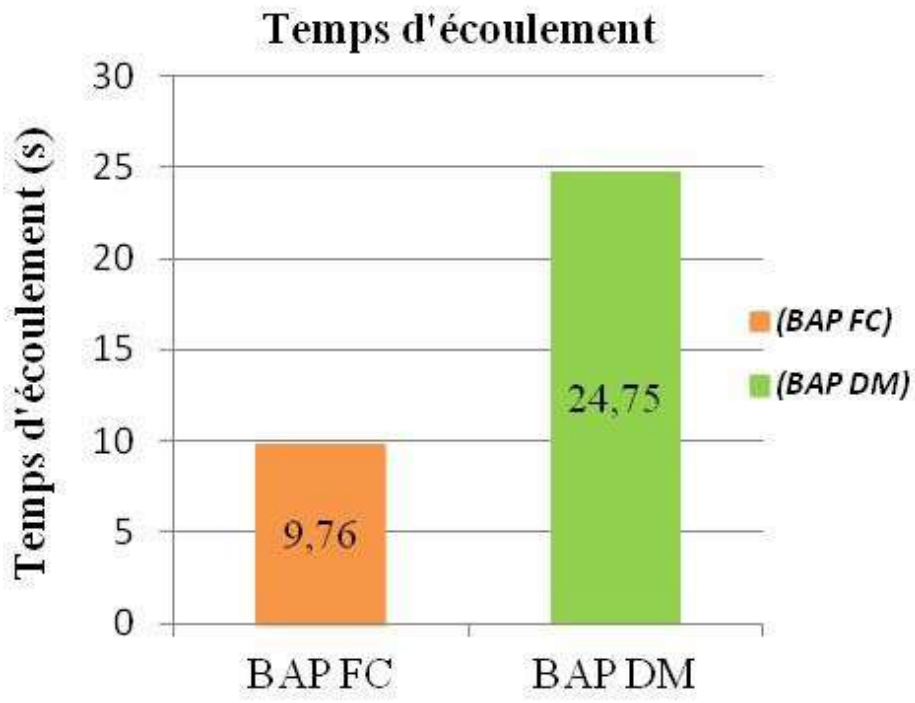


Figure I.20 : Comparaison entre le temps d'écoulement de (BAPFC) et

(BAPDM).

I.11.6. 2. Etat durci

Haddadou.N **[50]** constate que la résistance à la compression augmente à fur et à mesure que l'âge augmente et elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de PM incorpore. Pour un pourcentage de 30% de PM incorporé la résistance à la compression du béton représente près de 81% de la résistance du BAP avec 5% de PM, ceci est dû à la nature de la PM qui appartient à la famille des fillers quasi inertes **[56, 57, 58]**. Ces fillers sont composées principalement de CaCO3. Cet élément accélère l'hydratation du C3S, ce qui améliore les résistances aux jeunes âges **[59, 60]**. Néanmoins, l'effet associe de ces fillers est la réduction du potentiel pouzzolanique qui cause la diminution des résistances à long terme **[61]**.

Autrement dit que, si le filler PM accélère l'hydratation des BAP au jeune âge, son effet a tendance à se stabiliser à long terme **[62, 63]** ; de plus, l'augmentation du dosage en filler ne semble pas avoir une influence significative sur le développement des résistances.

Topçu et al. **[64]** ont testé des BAP comportant la PM. Ces auteurs ont montré que la substitution du ciment par de la PM conduit à une diminution de la résistance à la compression, ce qui est en conformité avec nos résultats.

Les mêmes auteurs ont trouvé des résistances, à 28 jours, qui varient entre 30 et 60 MPa.

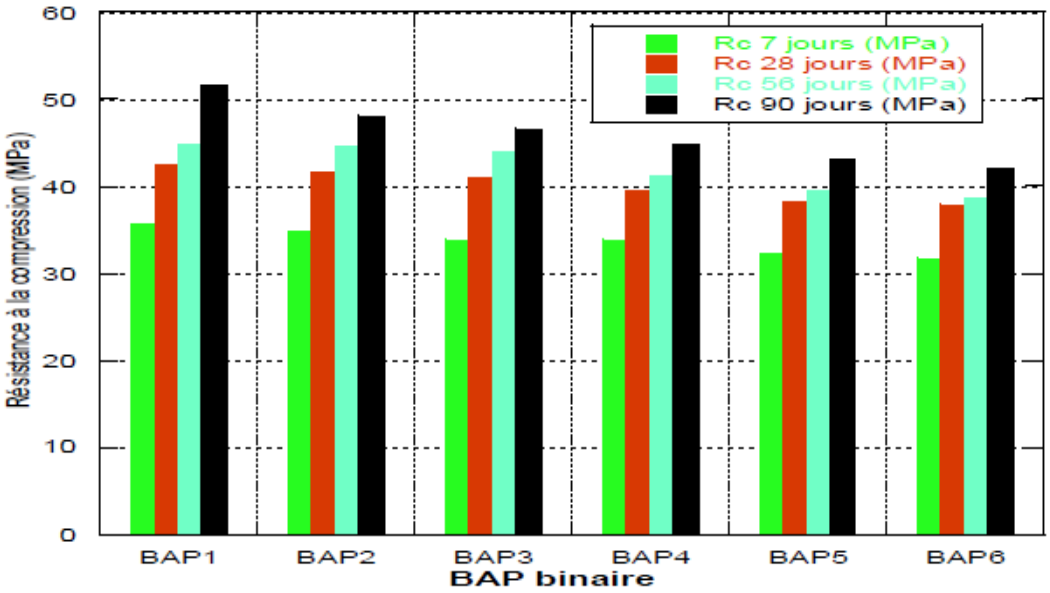


Figure I.21 : Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la compression à différents âges.

Tennich.M et Ben Ouezdou.M **[65]** ont constaté que les bétons autoplaçants ont développés des résistances plus importantes que le BOV à jeune âge (3jours). On peut constater aussi que la courbe du BAPT a la même allure que le BOV mais avec des performances nettement supérieures.

Les résistances à la compression des trois autres BAP avec déchets sont proches du BOV pour l'âge de 28 jours mais représentent des valeurs un plus faibles à 14 jours. Ceci ils conduisent a montré que :

- Le dosage en SP dépend de la finesse des additions calcaires. Plus le filler (filler calcaire ou déchets de marbre ou de carrelage) est fin, plus que le dosage en SP diminue.
- La substitution de filler calcaire par les déchets de marbre et de carrelage donne une fluidité et une résistance a la ségrégation satisfaisante des BAP étudies et s'approchent de celles d'un béton autoplaçant témoin à base de filler calcaire.
- Le béton autoplaçant témoin (BAPF) a développé des résistances supérieures par rapport à ceux contenant des déchets de marbre et de carrelage ainsi que celles du béton ordinaire vibré, mais les valeurs de ces derniers restent acceptables et intéressantes.
- Les bétons autoplaçants à base de déchets de marbre et de carrelage ont donné des résistances à la traction nettement plus meilleures que celle du béton ordinaire vibré (BOV).
- Les déchets de marbre et de carrelage ne manifestent aucune réactivité qui contribue à la résistance en compression ou à la traction. Ils sont des additions complètement inertes comme le filler calcaire.

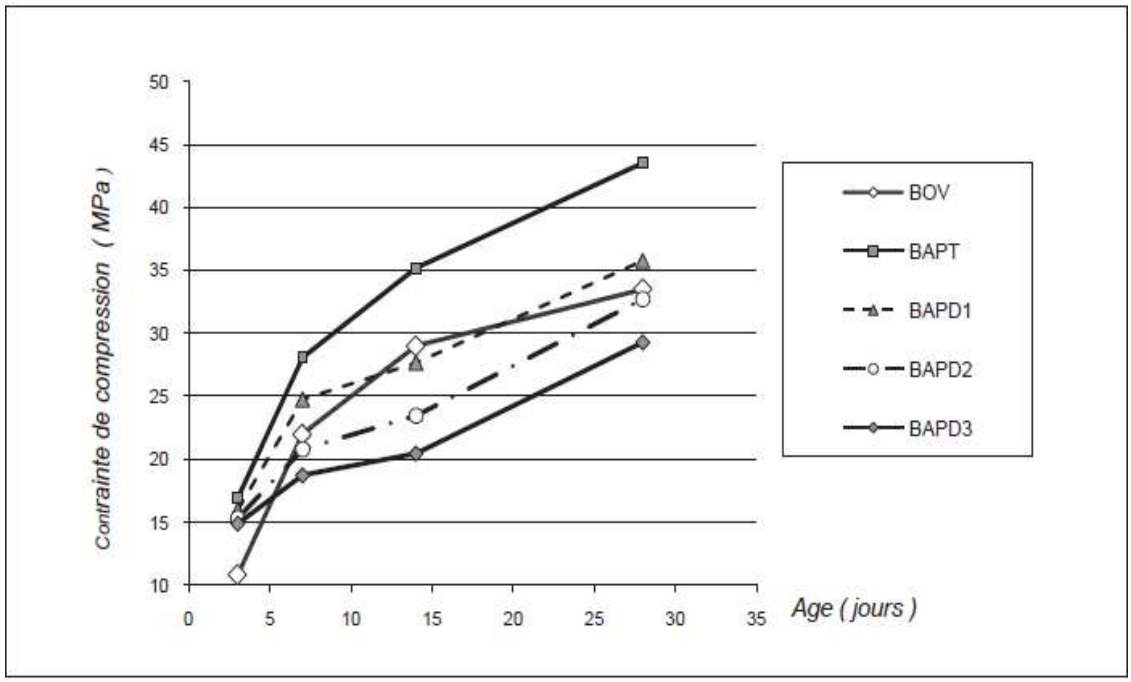


Figure I.22 : Résistance à la compression pour différents bétons.

CHIBANI.N et HOUARI.H **[55]** ont trouvé que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes. Elles présentent la même allure quelle que soit le type de béton.

La résistance initiale au jeune âge (3jours) de béton (BAPDM) atteint (40%) par rapport à la résistance a 28 jours, et a 7 jours l'hydratation de béton (BAPDM) affiche une augmentation de résistance de 8MPa. En d'autre terme le béton (BAPDM) atteint presque (59%) ce qui montre que plus de la moitié de la résistance est acquise pendant les 7 premiers jours.

Et entre 28 jours et 90jours, la résistance obtenue de béton (BAPDM) n'enregistre pas une augmentation sensible, on voit une différence de 1 MPa. En d'autres termes une augmentation de (3%) par rapport à 28 jours.

Le béton (BAPDM) donne de meilleures performances que le béton de référence (BAPFC) à jeune âge, moyen et long terme, On rappelle que la quantité de superplastifiant utilisée dans la formulation de (BAPDM) est supérieure à celle employée dans la formulation de (BAPFC) (respectivement de 11,32 à 10.50 kg/m^3) et de tels produits peuvent avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique, malgré E/C de béton (BAPDM) est légèrement supérieure que E/C de béton (BAPFC) (respectivement de 0,455 à 0,45). Ce qui confirme le rôle et la fonction d'un retardateur de durcissement joue par le déchet de marbre.

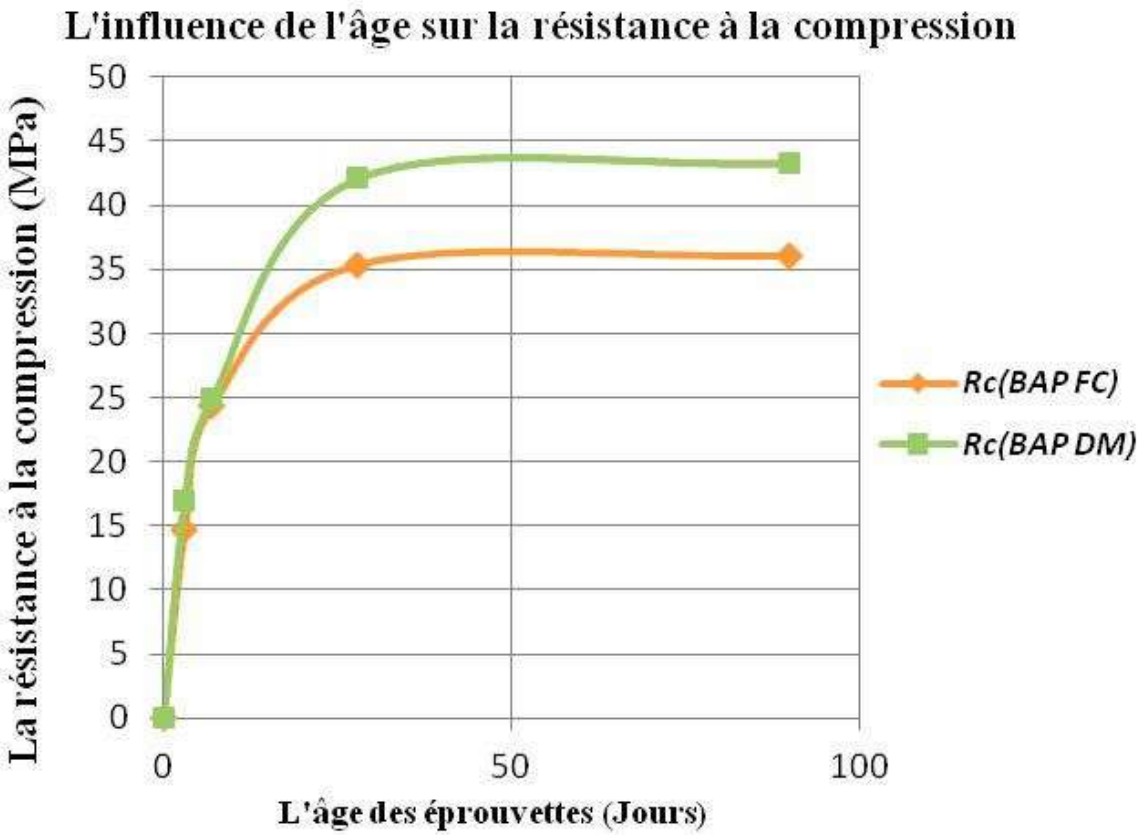


Figure I.23 : Evolution de la résistance à la compression Comparaison en fonction du temps de(BAPFC) et (BAPDM).

I.11.6. 2. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la problématique des déchets usagés non réutilisables, ainsi que de leur recyclage et valorisation. Puis on a donné une généralité sur les différents déchets de marbre (définition, origine, composition, propriétés, utilisation), le béton autoplaçant (définition, historique, composition, caractéristiques, utilisation), puis on a terminé ce chapitre par la valorisation des déchets de marbre dans les matériaux cimentaires.

Chapitre 2 :
Matériaux et l'essai

II.1. INTRODUCTION.

Dans ce chapitre on va présenter les matériaux de construction utilisés pour la confection des bétons étudies avec leurs caractéristiques et les essais faites au laboratoire, comme pour tous les bétons, la formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues à savoir :

La caractérisation des bétons à l'état frais, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai.

La caractérisation des matériaux faite sur quatre types de béton:

BAP0 : béton autoplaçant deréférence (témoin)

BAP1 : béton autoplaçant +déchet de marbre (5%)

BAP2 : béton autoplaçant +déchet de marbre (10%)

BAP3 : béton autoplaçant +déchet de marbre (15%)

II .2. Caractérisation des matériaux utilisés

II.2.1-Le sable

Dans cette étude, on a utilisé un seul type de naturel provenant de la carrière de Bouguezoul (Médéa).

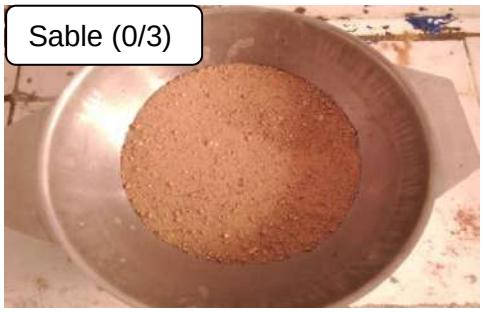


Figure II.1 : le sable utilisée

II.2.2 : Les graviers.

Deux classes granulaires de graviers sont employées dans ce travail ; la fraction 3/8 et la fraction 8/15.Leurs courbes granulométrique sont données sur la**(figure. II.2)**



Figure II.2 : le gravier utilisé

II.2.3 : le ciment

Il s'agit de ciment portland « MOKAOUEM plus » CEM I/A 42.5, qui a une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa**(Figure II. 3)**, produit par la cimenterie (LAFARGE).

Ce ciment est constitué 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%)peuvent être incorporés dans ce ciment. On trouve également de la magnésie (MgO) et sulfates (SO3) et le feu**.**

CRS présente des performances mécaniques et des caractéristiques physicochimiques. Les caractéristiques dans le Tableau II. 1

Tableau II.1: Propriétés physiques de ciment utilisé

Caractéristiques	Valeurs
Consistance normale (%)	27
Le temps de prise (min)	2 :40-3 :45
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g) **Finesse (Cm^2/g)**	3200
Masse volumique absolue (g/cm3	3.15



Figure II.3: Le ciment utilisé

II.2.4 : Déchets de marbre

Les déchets de marbre utilisé dans ce travail de recherche proviennent du marbrier de la wilaya de Médéa sous forme :

- Des morceaux de marbre marron

Les déchets de marbre obtenus sont incorporés dans la masse de béton autoplaçant par substitution partiel du ciment avec des pourcentages de (0%, 5%, 10%, 15%). Leurs caractéristiques physiques sont mentionnées dans le Tableau II.2 Suivante :

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques des fins de marbre utilisées.

Caractéristiques	Valeurs
La masse volumique absolue (g/Cm^3)	2.77
La finesse de Mouture (Surface Spécifique de Blaine SSB) (Cm²/g)	3700

- Préparation de marbre utilisée :

La préparation se fait par plusieurs étapes :

- Concassés manuellement
- Concassés par la mâchoire concasseur

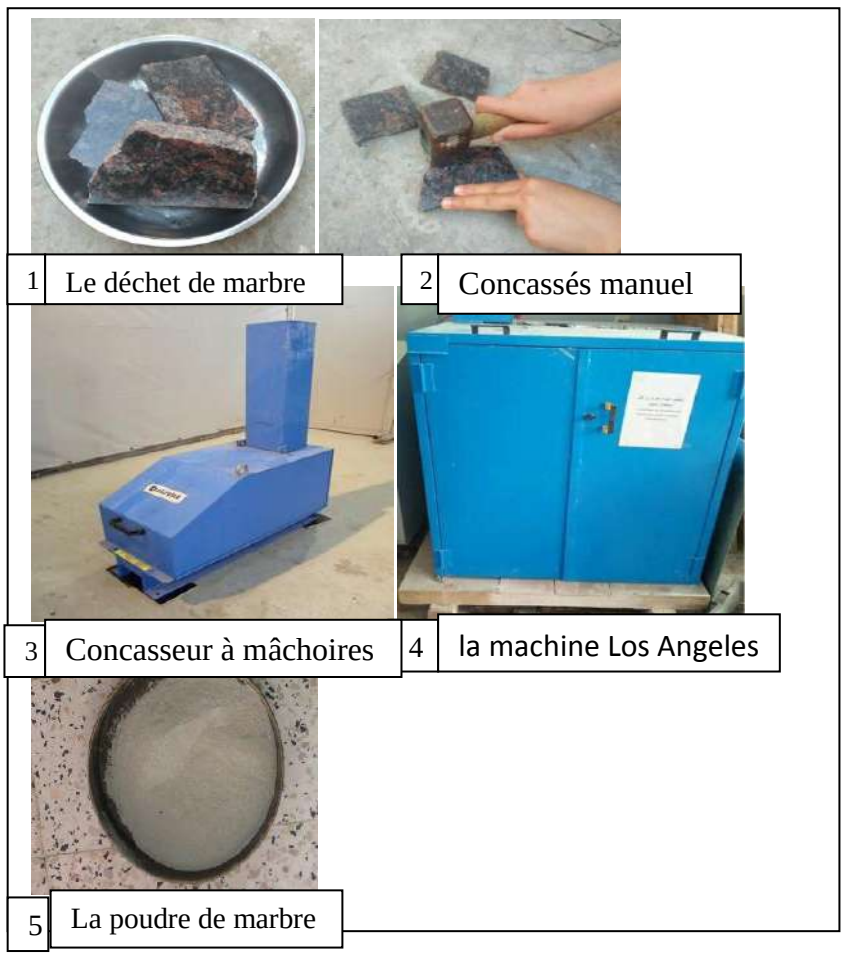


Figure II.4 : Protocole d'obtention de déchets de marbre.

II .2.5 : Superplastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom suivant : MEDAFLOW 30. Il est à base de polycarboxylates (PC), sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment.

Représenter Les caractéristiques de superplastifiant dans un tableau :

TableauII.3 : Les caractéristiques de superplastifiant

Caractéristiques	Valeurs
Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
pH	6 – 6,5
Densité	1, 07 ± 0,01
Teneur en chlore	< 0,1 g/l
Extrait sec	30%



Figure II.5 : Superplastifiant

II.2.6 : L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour gâcher les bétons autoplaçants est l'eau du robinet de notre laboratoire.

II.3. : Formulation du BAP

Afin de déterminer les quantités des autres matériaux : sable, ciment, gravier, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la méthode Japonaise (méthode générale) proposée par OKAMURA (La Méthode Générale) qui a été développée par Okamura et Ozawa.
Les différentes compositions sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : Compositions des différents BAP étudiés (pour 1m^3 de béton)

Poudre de marbre (%)	0	5	10	15
Gravier 8/15 (kg/m^3)	421	421	421	421
Gravier 3/8	421	421	421	421
Sable	815	815	815	815
ciment	497	474	450	427
Poudre de marbre marron	0	22	44	66
Superplastifiant	5,96	5,95	5,93	5,91
Eau	209	208	208	207

II.3.1. Les essais sur granulats

II.3.1.1. Analyse granulométrique(EN 933-1)[66]

A. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituent l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inferieur ou égale a 63mm, a l'excusions des fillers.

A notre qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. **[66]**

B. Equipement nécessaire

- Série de tamis dont le fond est constitue par un grillage de maillage carre s'étalententre 0.063 et 125 mm suivant une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10} = 1.259$.
- Machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire horizontal,ainsi que des secousses vertical, a la colonne de tamis.**[66]**

C. Description de l'essai

- Peser chaque tamis de la série vide ;
- Emboiter les tamis utilises les un sur les autres, les dimensions croissant de bas en haut et en plaçant un fond étanche a la partie inferieur afin de récupérer les éléments fins ;
- Placer la pile a tamis sur la machine a tamise ;
- Le matériau étudie est verse en haut de la colonne des piles, mettre le couvercle, et imprimer a l'ensemble une série de secousses ;
- En considère que le tamisage est termine lorsque les refus ne variant pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.
- Peser chaque tamis et calculer le refus ce tamis.**[67]**

La figure II.9 montre les étapes précédentes



Figure II.6:Protocol de l'essai d'analyse granulométrique

D. Expression des résultants

Les pourcentages des refus cumules, ou ceux des tamisât cumules, sont présents sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique.

Les résultats de l'essai pour les granulats utilisée sur la**(figureII.7)**sont présents les courbes granulaires (sable 0 /3, gravier 3/8 et 8/15).

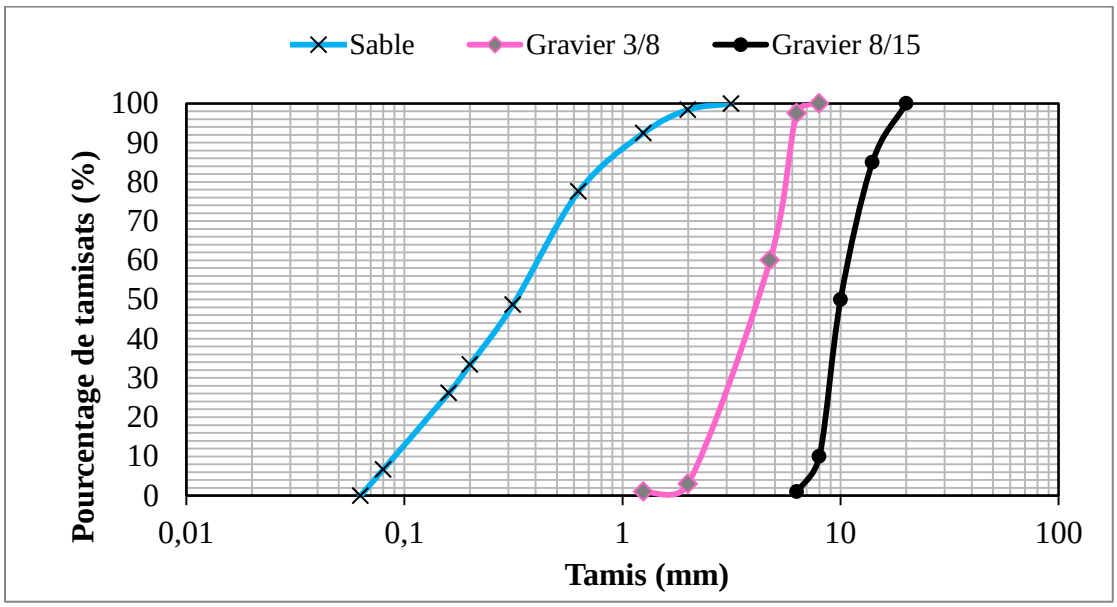


Figure II.7:les Courbes granulométriques des trois granulats utilisée

II.3.1.2. Masse volumique des granulats

A. Masse volumique apparent (NF P18-555)[68]

A.1. Définition

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant a la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée a partir d'un matériau compacte ou non compacte.

A.2. Conduite de l'essai

- mettre un échantillon de sable dans l'entonnoir
- verser le sable dans la mesure en ouvrant l'entonnoir jusqu' a ce qu'il déborde formant un cône
- araser à l'aide d'une règle
- peser le contenu soit M (en kg).**[68]**

La (**figure II.8)**montre les étapes précédentes



Figure II.8 :Protocol de l'essai de La masse volumique apparente

B. Masse volumique absolue (NF P18-555)[68]

B.1. Définition

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

Il ya deux méthodes pour mesurer la masse volumique absolue

1-méthode de l'éprouvette graduée

2-méthode de la mesure au pycnomètre.

On utilise la deuxième méthode.

B.2. Conduite de l'essai

- Déterminer avec précision la masse M1 du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au niveau du trait repère
- Déterminer avec précision la masse M2 d'un échantillon de matériau sec (environ20g) ;
- Introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre
- Remplir d'eau, fermer le bouc
- Amener le niveau de l'eau au niveau du trait repère
- Vérifier que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'aire .poser alors le pycnomètre, soit M3. **[68]**

La(**figure II.9)**montre les étapes précédentes



Figure II.9:Protocol de l'essai de La masse volumique absolue

Les résultants sont indique dans le **(tableau II.5)** pour les trois types des granulats :

Tableau II.5 : Masse volumique apparent et absolu des granulats

Granulats	Masse volumique absolue ρ_{abs}(g/cm3)	Masse volumique apparente ρ_{app} (g/cm3)
Sable (0/3)	2,72	1,43
gravier 3/8	2,6	2,59
gravier 8/15	1,3	1,29

II.3.1.3. Equivalent de sable (NF P18-598)[70]

A. But l'essai

Cet essai, utilise de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. il s'agit de déceler d'éléments fins dans un sable, et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique. Essai simple et rapide, matériel peu fragile aisément réalisable au laboratoire, a la carrier ou au chantier **[70]**

B. Conduite de l'essai

L'essai s'effectue sur un échantillon de sable humide afin d'éviter les pertes d'argile. Il faut vérifier que les grains de sable ont bien un diamètre inferieur a 5mm par tamisage et vérifier que la masse sèche de l'échantillon soit de 120g.

- Le sable est incorpore dans une éprouvette normalisée et préalablement remplie de solution≪ lavant ≫. l'ensemble est agite a la main pour bien humidifier le sable et déloger les bulles d'air. L'humidification dure dix minutes.
- L'éprouvette est ensuite placée horizontalement dans une machine à vibrer automatique. l'éprouvette est vibrée 90 fois en 30 secondes.
- Les éléments argileux flocules sont ensuite remontes a l'aide d'un tube plongeur qui injecte de la solution ≪lavante≫. Les bords supérieurs du tube sont aussi nettoyés pour que l'ensemble de l'échantillon soit plonge dans la solution. Le tube est plonge au fond de l'éprouvette et remonte lentement pendant que l'éprouvette est tournée également lentement. L'argile a flocule et se reparti dans la solution ≪lavante≫. L'éprouvette va reposer durant 20 minutes le temps que tout le floculat argileux se dépose sur le sable brut.

- La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible. Il est possible demesurer a l'Œil et au règle, la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut pour endéterminer la proportion, l'E.S

- Il est aussi possible de prendre cette mesure a l'aide d'un piston normalise quitraverse la couche d'argile pour se poser sur le sable brut. La hauteur totale du sablese mesure comme précédemment. La longueur de la tige du piston correspond a lahauteur de l'éprouvette. La mesure de la longueur de la tige qui n'a pas pénétréedans l'éprouvette correspond alors a la hauteur de sable brut.**[69]**

La**(figure II.10)**montre les étapes précédentes

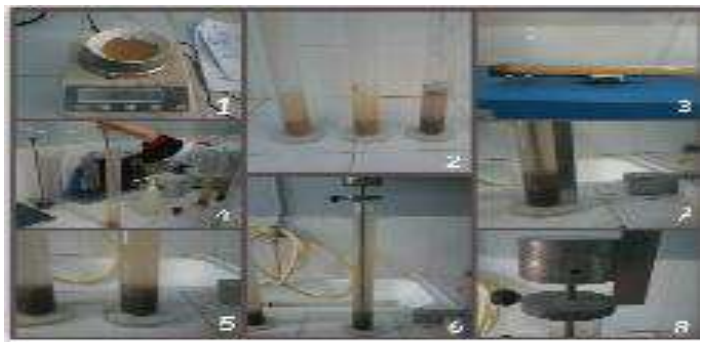


Figure II.10:Protocole de l'essai équivalent de sable

C. Expression des résultants

On calcule, pour chaque éprouvette, ESV et ES avec une précision décimale et on réticent les moyennes arithmétiques, arrondies chacune a l'entier le plus proche.

$$ESV = \frac{h_2}{h_1} * 100 ES = \frac{h'_2}{h_1} * 100$$

L'essai donne les résultats présentes dans le**(tableau II.6)**

Tableau II.6 : équivalent de sable

Granulats	Equivalent de sable à vue (%)	Equivalent de sable à piston (%)
Sable (0/3)	76,19	71,42

II.3.1.4. Coefficient d'absorption d'eau (NF P18-555)[68]

Certain 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'a saturation a la masse de l'échantillon sèche**. [68]**

Les résultants de caractérisation de l'absorption des différents granulats sont récapitules dans le **(Tableau II.7).**

Tableau II.7 : Résultats de l'absorption

Granulats	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Taux d'absorption d'eau (%)	1,2	0,9	0,6

II.3.1.5. Module de finesse de sable (NF P 18 -304)[71]

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 mélange sera insuffisante et tendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifie par le calcul du module de finesse (MF). Celui –ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumules, ramènes à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35,38. Ce paramètre est en particulier utilise 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 résultants sont indiques dans le tableau suivant :

Tableau II.8 : Module de finesse des granulats

Granulats	**Sable (0/3)**	**Spécification**
le module de finesse	2.2	2.8<MF<3.2 sable grossier 2.2<MF<2.8 sable moyen 1.8<MF<2.2 sable fin

II.4. Séquence de malaxage du BAP :

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à un béton performant et durable.

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres. Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences.

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la(**figureII.11.)**, elle suit les étapes suivantes :

- Calculer la quantité d'eau effective que l'on va mettre dans la bétonnière. Ce calcul permet de prendre en compte l'eau contenue dans les gros granulats et le sable tout en connaissant le coefficient d'absorption de chacun
- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant
- Malaxer le sable, ciment, poudre de marbre et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau)
- Malaxer pendant 5 minutes
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;

Malaxer pendant 30 secondes



Figure II.11: Séquence de malaxage du béton autoplaçant

II.5 : Essais sur BAP

II.5.1 : 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 Lesrecommandations de l'AFGC.

A : Essai d'étalement (BAP)

Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton . Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres.

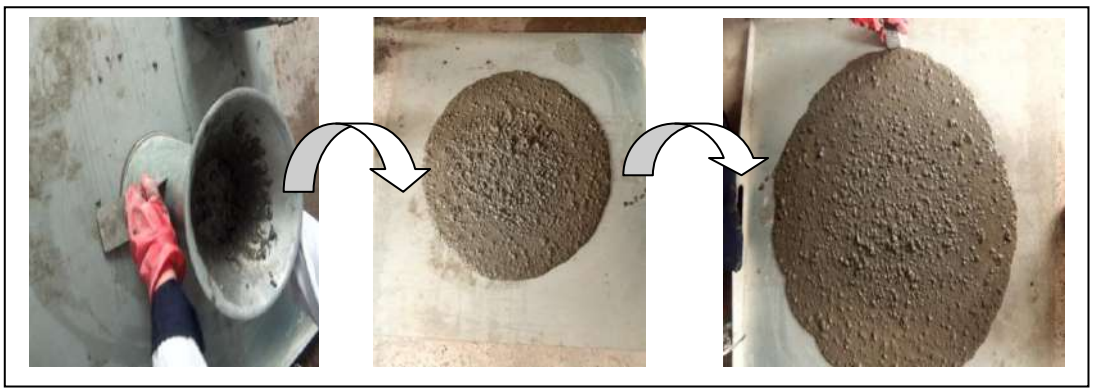


Figure II.12 : Essai d'étalement

B : 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.

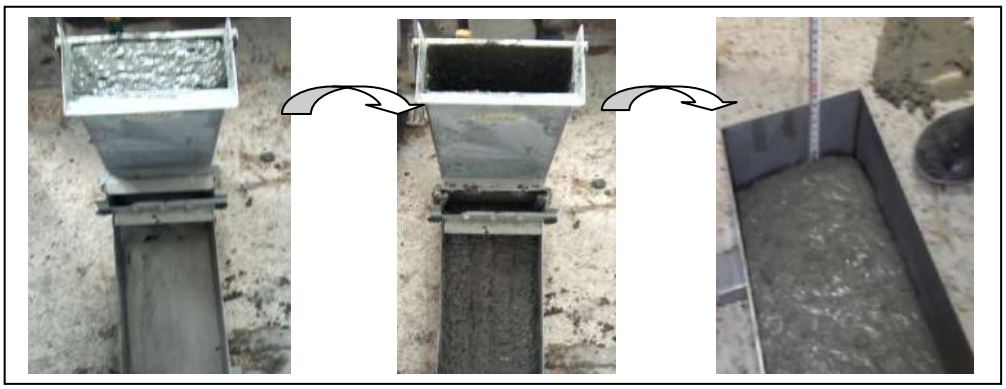


Figure II.13 : Essai de la boîte en L

C : Essai de stabilité au tamis

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remonté de la pâte qui est légère. De plus par cet essai on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire, soit dans les 15 minutes après la gâchée.



Figure II.14 : Essai de stabilité au tamis

D : Essai d'entonnoir « V-Funnel »

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir est rempli de béton jusqu'à arasement. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement doit être inférieur à 10 secondes pour l'entonnoir SS (Small) et à 12 secondes pour l'entonnoir LS (Large) pour que le béton soit considéré comme ayant une résistance à la ségrégation suffisante.

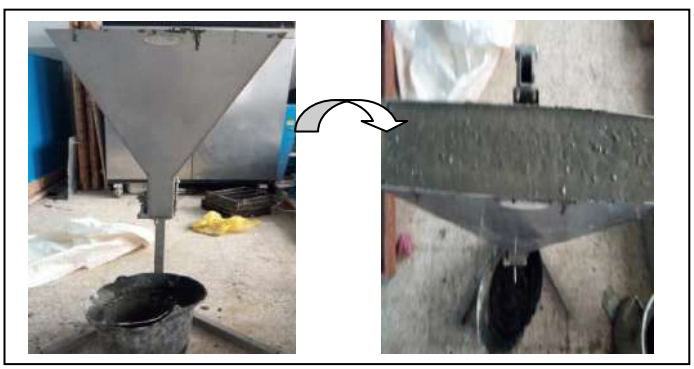
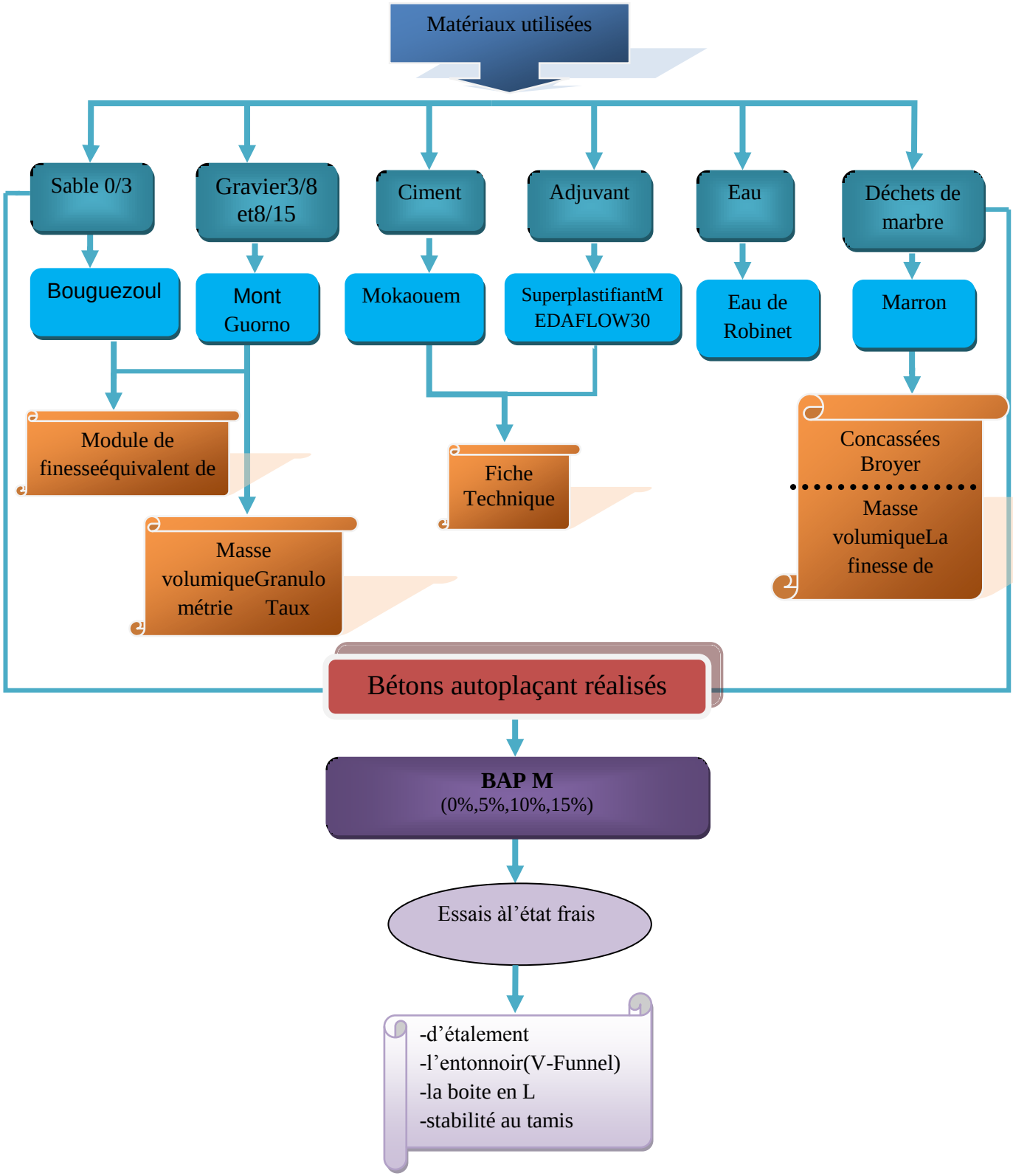


Figure II.15: V- funnel utilisé.

II.6 :Variables étudiées



FigureII .16: Variables étudiées.

II.7 :CONCLUSION :

Le programme expérimental retenu pour la confection des BAP nécessite dans une première étape de faire un choix des matériaux à utiliser, parmi ceux existants sur le marché (le ciment, les granulats, les superplastifiant) , et le déchet du marbre constitue une alternative économique et technologique importante

Cette partie de l'étude a successivement traité les points suivants : - -

-Caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés dans les compositions des BAP.

- Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur des bétons autoplaçants. Pour déterminer leurs caractéristiques rhéologiques (essais d'étalement T50 au cône, écoulement à l'entonnoir (V-Funnel), de stabilité au tamis, L-Box). Pour reconnaitre l'effet de la poudre du marbre sur le béton Autoplaçant à l'état frais.

Chapitre 3 :
Résultats et interprétation

III.1-Introduction

L'étude expérimentale a pour objectif principal d'étudier l'effet des déchets de marbre sous forme de poudre sur le comportement du béton autoplaçant (BAP) à l'état frais ,et Dans ce dernier chapitre on présente les résultats obtenus pour les différents essais réalisés sur le béton autoplaçant à l'état frais. Les résultats sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des résultats d'essais.

III.2 -Etude à l'État frais

La caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais suivants : L'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, la stabilité lors de l'écoulement au V funnel et stabilité au tamis.

III.2.1 –l'Étalement

- **Etalement (mm)**

L'étalement des bétons autoplaçant trouvés sont résumés sur **(Figure.III.1)** suivante :

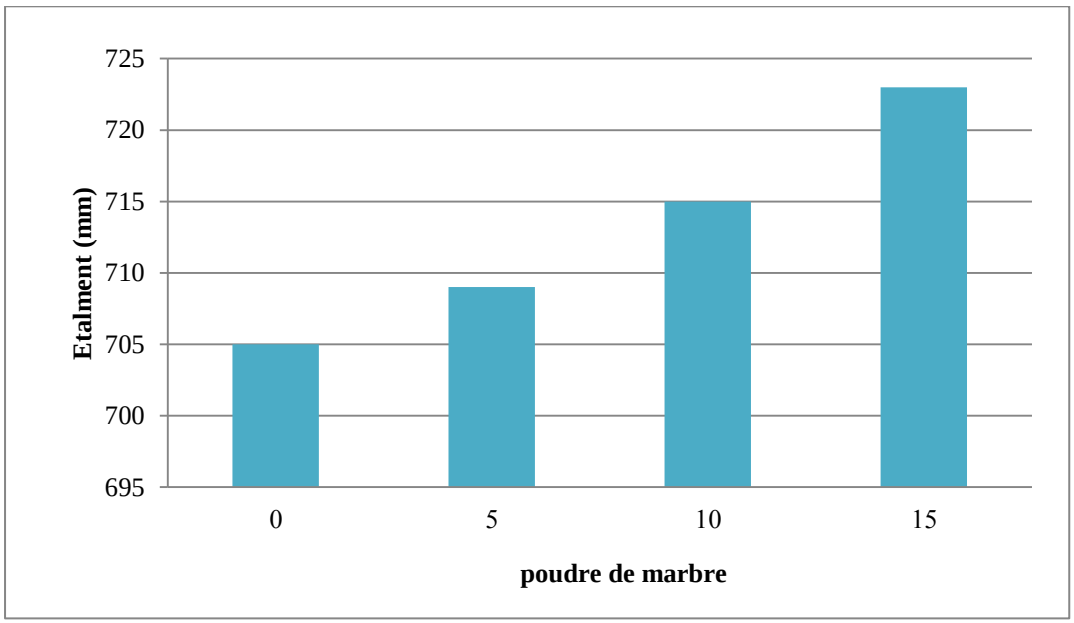


Figure. III.1 Etalement des BAP à base de poudre de marbre

D'après les figures ci-dessus, on remarque que l'étalement de bétons autoplaçant varie en fonction du pourcentage de substitution du ciment par le déchet de marbre. On constate aussi

que plus le pourcentage de déchets de marbre augmente, plus l'étalement augmente. Cela est exprimé que la poudre de marbren'absorbe pas l'eau. Pandey et al.[50] ont constaté que l'affaissement augmente en fonction d'augmentation de la poudre de marbre substitué dans le ciment.

- Temps d'écoulement T50(sec)

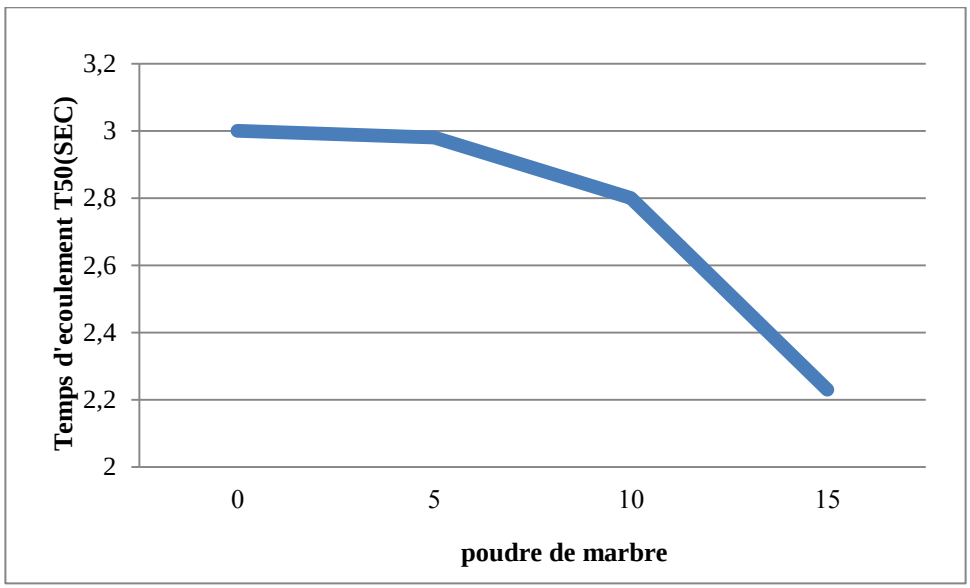


Figure. III.2 : Temps d'écoulement T50(sec) des BAP à base de poudre de marbre

Les résultats ont révélé que le temps d'écoulement T50 est inférieur à 3,40s recommandé par EFNARC [72].

L'augmentation de volume de la poudre de marbre conduit a la diminution du temps d'écoulement

III.2.2- Temps d'écoulement à travers le V-Funnel

Les mesures du temps de passage de différents BAP obtenus sont représentées dans la figure ci-dessous :

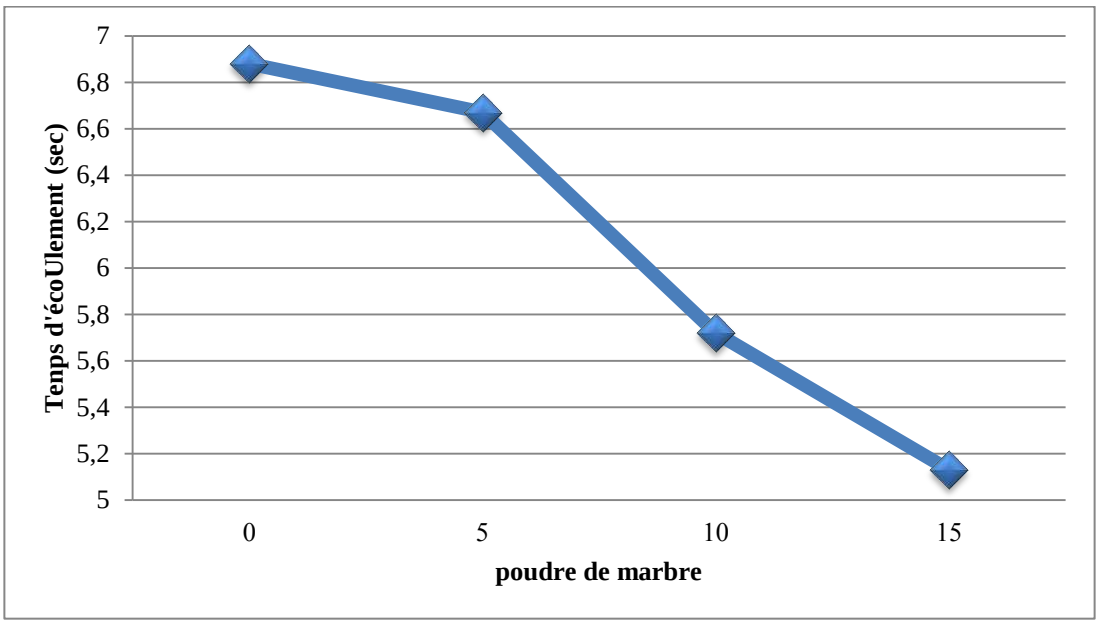


Figure. III.3Temps d'écoulement des BAP à base de poudre de marbre

De la même que les résultats de T50, les résultats d'essais V-funnel montrent aussi que le temps d'écoulement diminution en fonction d'augmentation de poudre de marbre. Cette augmentation est liée à la forme anguleuse de poudre de marbre marron.

III.2.3- Boite en L

Les résultats de cet essai sont résumés sur la **Figure.III.4**suivante :

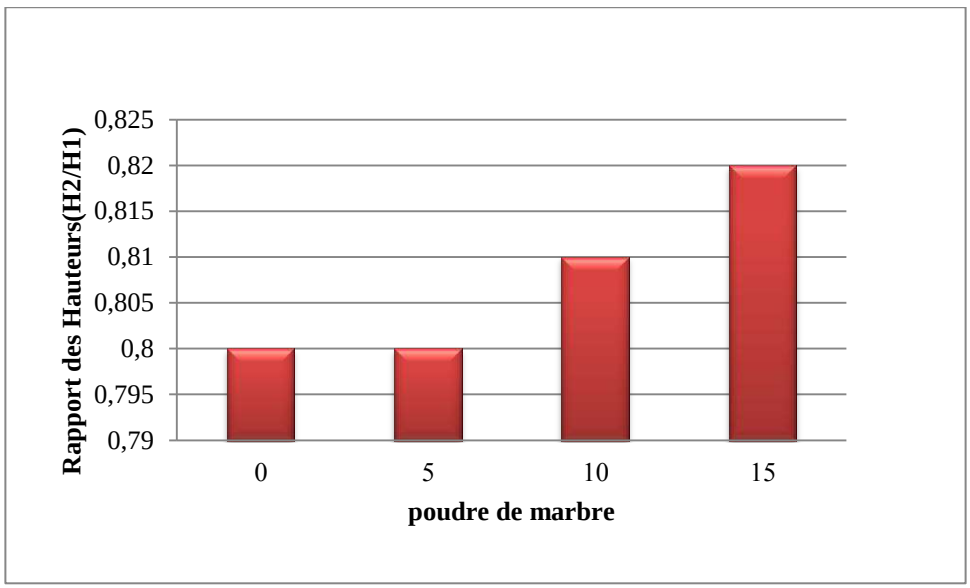


Figure. III4 :Rapport des Hauteurs (H2/H1)des BAP à base de poudre de marbre

On remarque que le rapport H2 /H1 augmente avec l'augmentation de Pourcentage de marbre.

-Pour le BAP témoin et BAPDM(5%) ce rapportFIX2 à 0.80 , qu'est la limite donnée par les recommandations de l'AFGC

-Le BAP dosé à 15% de marbre marron se caractérise par une bonne fluidité, mais aussi par une bonne capacité au remplissage qui est assurée par l'action combinée du superplastifiant et de poudre de marbre marron.

III.2.4- stabilité au tamis

Les essais sur la ségrégation statique sont présentés sur l'histogramme de la **Figure. III.5**

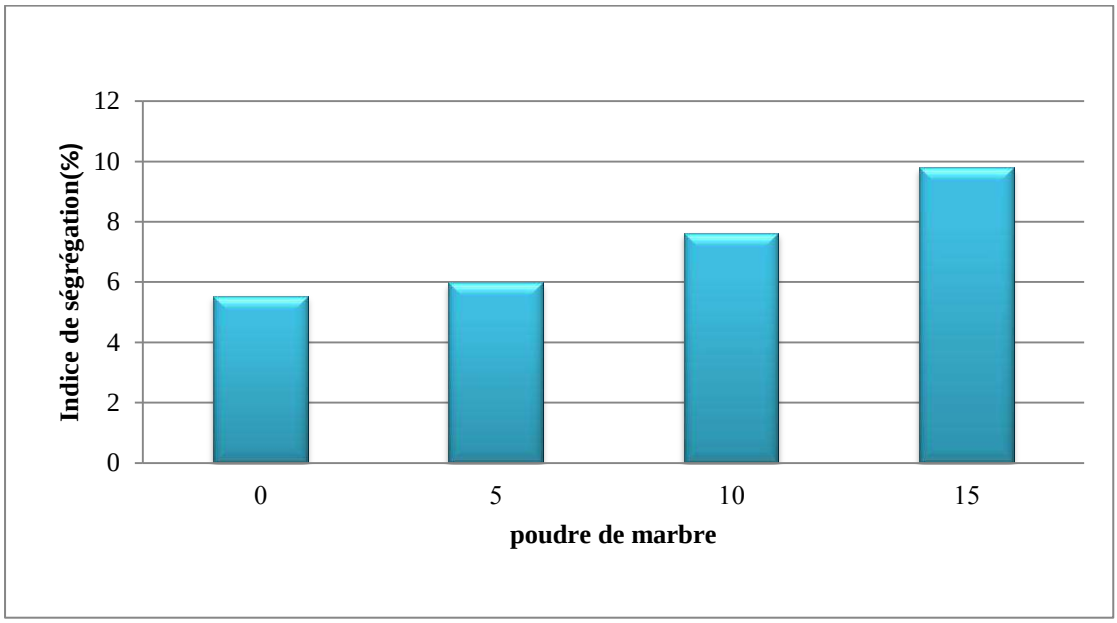


Figure. III.5 : Indice de ségrégation des BAP à base de poudre de marbre

On remarque Sur la ségrégation statique, tous les BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15 %, synonyme d'unestabilité correcte selon les recommandations de l'AFGC [ref]

Ces résultats permettent de qualifier les BAPà base de marbre (0 %,5 %,10 % et 15 %) comme étant des bétons stables le pourcentage de laitance étant inférieur à 15% pour lesquatre bétons Cette stabilité est assurée d'une part, par l'importante quantité de mortier (liant) quecontient le BAP et d'autre part, par l'ajout de superplastifiant incorporé lors de sa fabrication.

III.3 – Conclusion

Des résultats trouvés dans ce chapitre on peut conclure que :

-L'étalement de BAP est augmente en fonction d'augmentation de la poudre de marbre de la même que pour les essais de stabilité au tamis et la Boite en L.

-Le temps d'écoulement à travers le V-Funnel et Temps d'écoulement T50 (sec) diminué avec l'augmentation de pourcentage de poudre de marbre

- La poudre de marbre améliore les propriétés des BAP à l'état frais.

Conclusions Générales
Et Recommandations

Conclusions Générales

Les objectifs de ce travail étaient de rechercher une méthode qui prévoyait la conception d'un béton autoplaçant dans le contexte Algérien. S'en est suivie l'évaluation de l'influence des ajouts (poudre de marbre)

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de déchets de marbre sur le comportement du BAP peut mener aux quelques conclusions suivantes :

Plus on augmente la fraction volumique du pourcentage de poudre de marbre , l'étalement augmente , T50 diminue, le V-funnel diminue , la capacité de passage et de remplissage diminue (H2/H1 augmente) et le risque de ségrégation augmente.

Le BAP avec la substitution de 5% du ciment par la poudre de marbre peut être considéré comme matériau économique et sur la base il est fort recommandé aux ingénieurs du BTP et aux utilisateurs du ciment dans la construction.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des déchets de marbre comme un liant binaire constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays.

Recommandations

Dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre de cette recherche et sur la base des résultats importants trouvés, des travaux restent à mener dans plusieurs axes à savoir :

- Etude de la rhéologie de béton autoplaçant à base de déchets de marbre .
- Valorisation de déchets de marbre dans le BAP.
- Etude du pompage de BAP à base de déchets de marbre.
- Prévoir une modélisation des résultats permettant les prévisions sur les caractéristiques des bétons réparés.
- Influence du décher de marbre sur le béton autoplaçant.

annexe

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BÉTON

- **LES DONNEES**
- Pour un volume de béton de V=33 litres (par exemple)
- **Masses volumiques**

  - **Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : ρ_G=1373kg/m 3**

  - **Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : ρ_{AG}== 2560kg/m 3**
  - **Masse volumique absolue du sable : ρ_S= 2630kg/m 3**

  - **Masse volumique absolue du ciment : ρ_C=3150kg/m 3**

  - **Coefficients d'absorption**

- Coefficient d'absorption du sable : A_{bs} = 0.6
- Coefficient d'absorption du sable : A_{bG} = 2.22

  - Le rapport Sable/Mortier : S/M = 0.50
  - Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$\mathbf{G(kg/m^3)=\frac{\rho_G}{100}*50}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : A=1% du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de E/C_{volume} =1.26 par unité de volume de ciment et E/C_{poide} = E/C_{volum} 40.0 par unité de poids de ciment.

- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW145) : % Sp = 1% du poids de ciment.

- **CALCUL D'HUMIDITÉ**

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M 1 et un échantillon de gravier de masse M ' 1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse M 2 et M ' 2 les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable : $\boldsymbol{u_S = \frac{M_{1-M_2}}{M_2} * 100}$

L'humidité du gravier : $\boldsymbol{u_G = \frac{M_{1-M_2}}{M_2} * 100}$

- **CALCUL DES DIFFERENTS COMPOSANTS**
  - **Gravier**

La quantité G en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(kg) = \frac{G(\frac{kg}{m}^3) * V}{100} (1 + \frac{u_G - A_{bG}}{100})$$

  - **Sable**

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier dans le béton :

$$\boldsymbol{\%G = \frac{G(Kg/m^3)}{\rho_{AG} * 100}}$$

Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$\%M=100-\%G-\%A$$

Le pourcentage du sable dans le béton :

$$\%S=\frac{\%M*S/M}{100}$$

Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(Kg)=\frac{\%S*\rho_{AS}*V}{100}\left(1+\frac{U_S-A_{AS}}{100}\right.$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P=\%M-\%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C=\frac{1}{1+{}^{E}/_{C_{Volum}}}*\%p$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(Kg)=\%C*\rho_C*10*\frac{V}{1000}$$

- **Superplastifiant**

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m 3)

$$S_P(\text{Kg}/m^3)=\frac{\%S_P}{100}*\%C*\rho_C*10$$

La quantité de superplatifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$S_P(\text{kg})=S_P(\text{Kg}/m^3)*V$$

Eau :

L'eau ajoutée au béton (E) est divisée en deux partie : la première partie (E 1) est de 70% de (E) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (E 2), elle de 30% de (E) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\mathbf{\%E=\frac{E/C_{volum}}{1+E/C_{volum}}*\%p}$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenu dans le sable : e_1

$$e_1(Kg)=\frac{S*\rho_{AS}*V}{1000}(\frac{u_S-A_{bs}}{100})$$

L'eau contenu dans le superplastifiant : e_2

$$e_2(Kg)=\frac{G(Kg/m^3)*V}{1000}(\frac{u_G-A_{bG}}{100})$$

L'eau contenu dans le superplastifiant :e_3

$$e_3 = \frac{s_p(kg) * 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

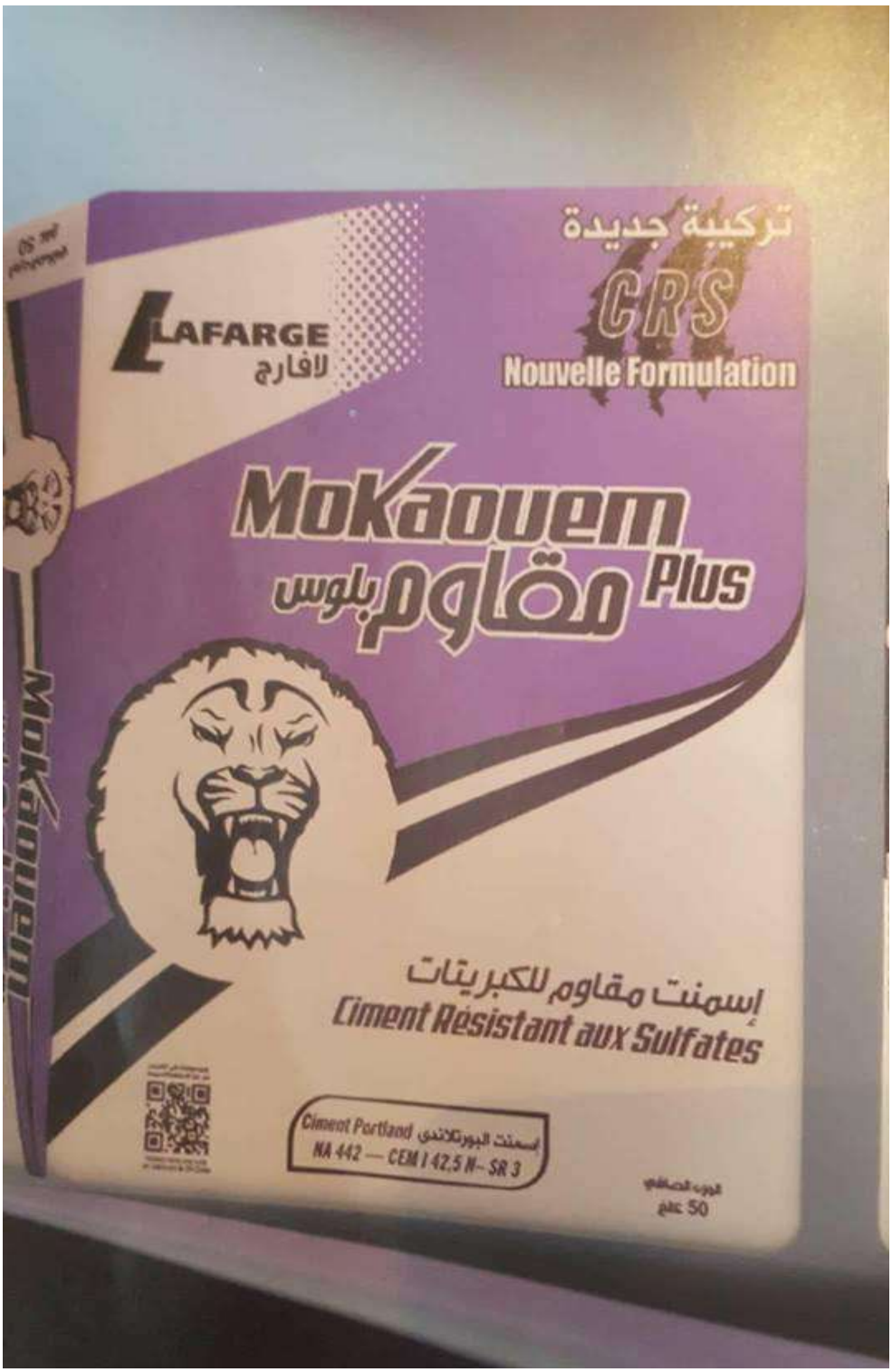
D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume Vde béton :

$$E(Kg) = \frac{\%E * 10 * V}{1000} - e$$

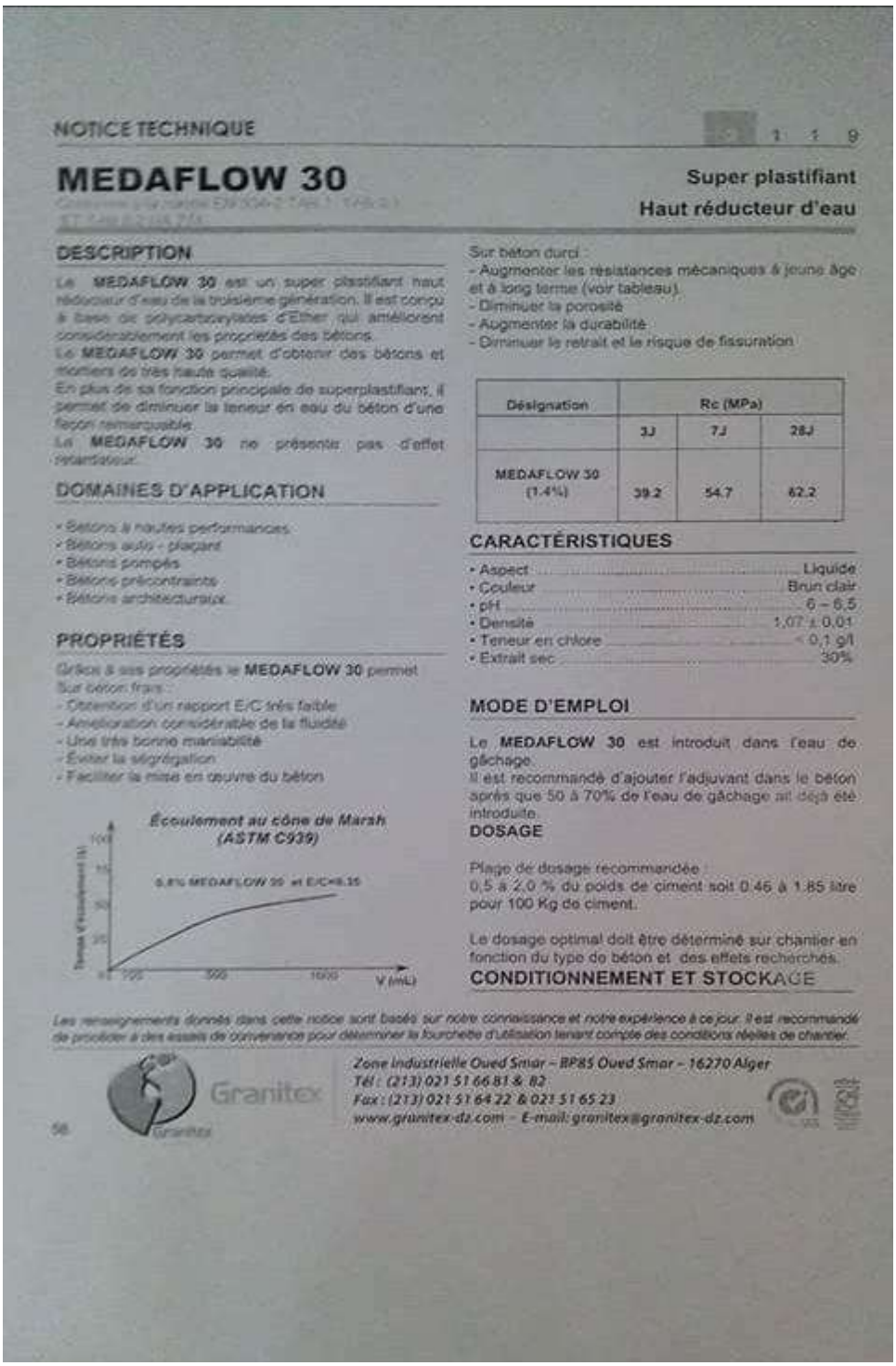
Avec :

Eau1 E_1(Kg)=0.70*E

Eau2 E_2(Kg)=0.30*E



Annexe .A: La fiche technique Ciment CRS (CEM I/A)



NOTICE TECHNIQUE

1 1 9

MEDAFLOW 30

Super plastifiant
Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.
Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

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

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet
Sur béton frais :
- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Eviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

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

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

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

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

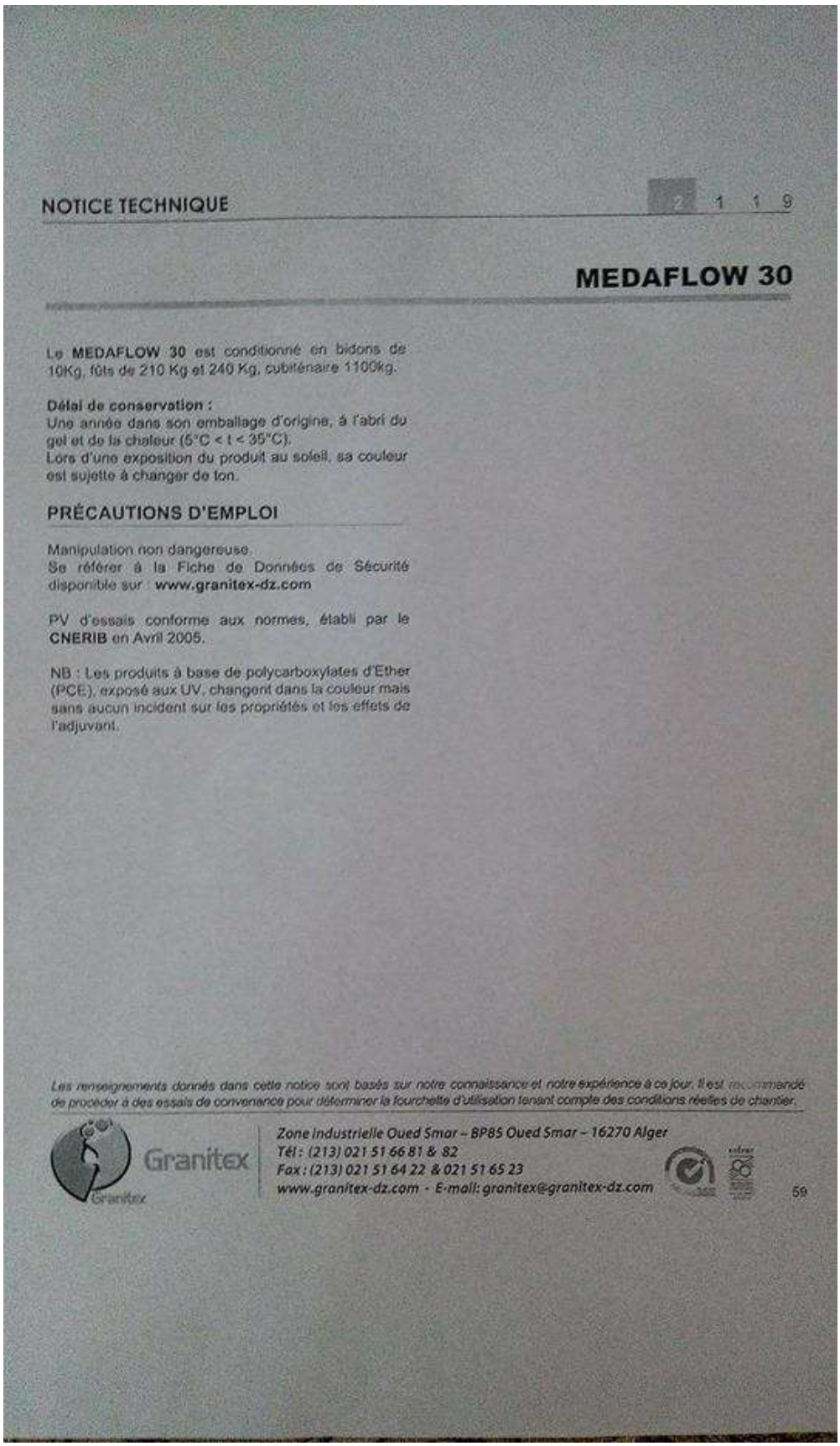
Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com – E-mail: granitex@granitex-dz.com

58

Annexe .: B. La fiche technique du super plastifiant.



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30

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

Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

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

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

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

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

Granitex

Granitex

Zone Industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

59

Annexe .B: La fiche technique du super plastifiant.

Références Bibliogaphiques

[1]: BENAKLI SARAH, Mémoire de Magistère en Génie Civil **«** thème *Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction*.

[2]: Gunning .J.G," concrete technology: level 4 ", Longman technician series, Const& civil engineering, England, 1983.déchets de construction **».**

[3]: BARON. J et OLLIVIER.J : « Les bétons : bases et données pour leur formulation » Edition Eyrolles. 1999

[4]: OLLIVIER. J.P et VICHOT A. pour l'ATILH : « La durabilité du béton.»- Presses de l'école des Ponts et Chaussées - Paris - 2008.

[5]: Collection CIM béton .Fiches techniques. Tome 1 : 71 pages. Réf. G10. Editeur Cimbéton. Septembre 2005.

[6]: DREUX G., FESTA J. : 1995, "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles.

[7]: Contexte normatif des bétons : Mise en page et réalisation : Amprincipe Paris (édition septembre 2005)

[8]: Mme BENAKLI SARAH Mémoire de Magistère en Génie Civil

« Thème Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction »

[9]: OKAMURA.H.OZAWA 1994, Self-compacting concrete, journal of advanced concrete technology.

[10]: YAMMINE JOUMANA., rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entreformulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques, thèse de doctorat,l'Ecole Normale Supérieure de Cachan**,** 262 p, 2007.

[11]: KHAYAT.H. « Optimisation et caractérisation des bétons autoplaçants pour coffrages fortement armes », Université de Sherbrooke Québec, CANADA.

[12]: MAHER EL BARRAK, thèse de doctorat contribution à l'étude de l'aptitude ç l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 12juillet 2005.

[13]: PHILIPPE TURCRY « retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de la formulation »Université de NANTES/ 03 Février 2004.

[14]: ADAM.M.NEVILLE ; propriétés des bétons, traduit par le CRIB, édition Paris Eyrolles DL 2000.

[15]: Collection Technique CIMbéton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.

[16]: AFGC : Groupe de travail Recommandation pour l'emploi des bétons autoplaçants, AFGC/PN B@P, Recommandations provisoires pour l'emploi des bétons autoplaçants, 63 p. Janvier 2008

[17]: BOUKNI BAZIZA : tenue en feu des bétons autoplaçants ; thèse de magistère, décembre 2007, Mentourie Constantine, Algérie.

[18]: J.BARON et J. OLLIVIER, les bétons bases et données pour leurs formulations, EYROLLES, 1999.

[19]: DREUX .G. « Le nouveau guide de béton » 1998.

[20]: LEGRAND C, la structure des suspensions de ciment, thèse de doctorat, université Paul Sabatier deToulouse, 1982.

[21]: MATA LUIS .A, implementation of self-consolidating concrete (SCC) for prestressed concrete Girdes, Master thesis of science in Civil engineering, Raleigh north Cardinal. 2004

[22]: J.C BRAQUENIER et J DESNYTER « Le béton autoplaçant ou autocompactant »,2000.

[23]: P.ROUGEAU et CH MARRY DIPPE, O.FRANCY, Les BAP : synthèse des connaissances et compagne expérimentale, CERIB, février 2001. .

[24]: KHAYAT et YAHIA, effect of welan gum: High range reducer combination on rhedogy of cement grout.ACI materials journal, vol 94N°5, September- October.1997

[25]: Bezzi Tiziri, Souidi Fatiha, Chelouah Nacer, Influence de l'ajout d'une argile locale, cuite et broyée, sur la résistance à la compression et le retrait d'un béton autoplaçant, Université Abderahmane MIRA, Béjaia, Algérie.

[26]: F. Souidi, N. Chelouah, A. Noumowé, A. Kaci, Communication. Exploitation d'argile dans la fabrication de mortiers écologiques, matériaux 2010-18-22, NANTES, France ,octobre 2010.

[27]: Chelouah N., Mehidi K., Chikh Amer H., Souidi F., 2009, Etude de l'influence de l'ajout d'argile broyée cuite sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des bétons, Rapport de recherche, J0400620070006, p.1-20, 2009

[28]: Sedran T. and De Larrard F. "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.321-332.

[29]: De Larrard F. "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000.

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

[31]: Bui V.K., Montgomery D., Hinczak I. and Turner K. "Rapid testing method for segregation résistance of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, 2002, vol 32, pp.1489-1496.

[32]: Bui V.K., Akkaya Y. and Shah S.P. "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, Novembre-Décembre 2002, vol 99, pp.549-559.

[33]: Jean-Christophe Braquenier « Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[34]:Lauritzen E. K., 'Recycling concrete-An Overview of challenges and Opportunities', in 'Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable Développent', ACI International, Special Publication SP-219, Edited by T. C. Liu. And Ch. Meyer, Published by ACI, USA, 2004, pp. 1-10.

[35]: Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires », documents scientifiques et techniques, AFGC, Juillet 2000.

[**36]: Walraven .J**, « Structural aspects of self compacting concrète », Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, 1998.

[37]: 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.

[38]: Grünewald.S, Walraven.J.C, « Rheological measurements on selfcompacting fibre reinforced concrète », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.

[39]: Nielsson.I, Wallevick.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.

[40]: 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.

[29]: De Larrard F. "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000.

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

[31]: Bui V.K., Montgomery D., Hinczak I. and Turner K. "Rapid testing method for segregation résistance of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, 2002, vol 32, pp.1489-1496.

[32]: Bui V.K., Akkaya Y. and Shah S.P. "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, Novembre-Décembre 2002, vol 99, pp.549-559.

[33]: Jean-Christophe Braquenier « Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[34]: Lauritzen E. K., 'Recycling concrete-An Overview of challenges and Opportunities', in 'Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable Développent', ACI International, Special Publication SP-219, Edited by T. C. Liu. And Ch. Meyer, Published by ACI, USA, 2004, pp. 1-10.

[35]: Association Française de Génie Civil, « Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires », documents scientifiques et techniques, AFGC, Juillet 2000.

[**36]: Walraven .J**, « Structural aspects of self compacting concrète », Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, 1998.

[37]: 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.

[38]: Grünewald.S, Walraven.J.C, « Rheological measurements on selfcompacting fibre reinforced concrète », Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.

[39]: Nielsson.I, Wallevick.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.

[40]: 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.

[41]: Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, « Rheological Model for self-consolidating Concrete », ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.

[42]: EN-12390-3 : résistance à la compression des éprouvettes.

[43]: EN-12390-5 : résistance à la flexion sur éprouvettes.

[44]: THIBAULT. B, BOUFFARD.M, HORLAIT.C, LACROIX.R : Projet IFIPS(2008)

[45]: Direction technique et commerciale béton : www.béton-vicats.Fr.

[46]: JOURNAL DE CETE (Centre d'étude Technique de l'Environnement, Lyon.

[47]: L.Azzouz ; M.Bouhicha ; S.Kenai ; M.Hadjoudja : Recyclage des déchets de briques dans le béton de sable de dunes (PROCEDINGS du 1er colloque national de génie civil : matériaux de construction, novembre 2000, université de Mostaganem).

[48]: B.E.D Import Blog sur la pierre naturelle.

[49] :https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_marbres_modernes

[50] : Haddadou.N, Thèse de Doctorat « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre ≫, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.

[51] :SONEBI M, BARTOS P J M, " Hardened SCC and its bond with reinforcement ", Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7),Stockholm, Sweden, 13-15 September, 275-89, 1999.

[52]: SAHMARAN M, CHRISTIANTO H A, YAMAN I O, "The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars" Cement and Concrete Composites 28(5): 432–40, 2006.

[53]: LANE R. O, BEST J F, "Properties and use of fly ash in Portland cement concrete", Concrete International, 4(7): 81–92, 1982.

[54]: YAHIA A, TANIMURA M, SHIMOYAMA Y, "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio", Cement and Concrete Research, 35(3): 532–9, 2005.

[55]: CHIBANI.N et HOUARI.H « VALORISATION DES FINES DE DECHETS DE MARBRE RECYCLEES DANS LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPLACANT (BAP) », Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie.

[56]: UYSAL M, SUMER M, "Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures", Construction and Building Materials, 25: 4112-20, 2010.

[57]: UYSAL M, YILMAZ K, "Effect of mineral admixtures on properties of selfcompacting Concrete", Cement and Concrete Composites, 33: 771-6, 2011.

[58] :UYSAL M, YILMAZ K, IPEK M, "The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete", Construction and Building Materials, 27(1): 263-70, 2011.

[59] :BONAVETTI V, DONZA H, MENINDEZ G, CABRERA. O., IRASSAR E.F.,

"Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy", Cement and Concrete Research, 33(6): 865–71, 2003.

[60] :PERA J, HUSSON S, GUILHOT B, "Influence of finely ground limestone on cement hydration", Cement and Concrete Composites, 21(2): 99–105, 1999.

[61]: HEIKAL M, EL-DIDAMONY E, MORSY M. S, "Limestone-filled pozzolanic cement", Cement and Concrete Research, 30(11): 1827–34, 2000.

[62]: ZHU W, GIBBS J C, "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting Concrete", Cement and Concrete Research, vol.35, n° 8, p.1457-1462, 2005.

[63]: VOGLIS N, KAKALI G, CHANIOTAKIS E, TSIVILIS S, « Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements », Cement and Concrete Composites, vol.27, n° 2, p.191-196, 2005.

[64]: TOPÇU I B, BILIR T, UYGUNOGLU T, "Effect of waste marble dust content as filler on properties of selfcompacting concrete", Construction Building Materials, 23(5): 1947‑53, 2009.

[65]: Tennich.M et Ben Ouezdou.M « Béton autoplaçant à base des déchets de marbreries etde carrelage » ; Université de Tunis El Manar-Tun

[66] : NF P18-555, (dec.1990). ≪ Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des sables ≫.

[67]: NF P 18-598, (Oct. 1991). ≪ Granulats- Equivalent de sable ≫

[68]: Bouhamou N., Belas N., Mebrouki A., Mesbah H. et Ammar Y. ≪ Etude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement a l'état frais du béton autoplaçant a base de matériaux locaux ≫ Sciences Technologies et Développement, ANDRU,2007, N°2, pp. 31-49.

[69]: MOKHTARI ABDESSAMED : Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforces de Fibres Végétales de Palmier Dattier Mémoire de magister de l'Université. e KASDI MERBAH OUARGLA

[70]: EN 196-1, *méthodes d'essais de ciment*, AFNOR,France 1994

[71]: NF P 18-304, (1973) Granulométrie des granulats

[72]: EFNARC: « The European guidelines for self-compacting concrete » The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005, 68p.