

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° :



DOMAINE : sciences technologiques

FILIERE : Génie Civil

OPTION : MATERIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par :

BAHACHE Ziad

Intitulé :

**Etude expérimentale d'un béton autoplaçant à base
de déchets de verre exposé à la haute température**

Devant le jury composé de :

Dr. Mekki Bibi	Professeur	Président
Dr. Zitouni Salim	MCA	Examineur
Mme. DJEBRI Noura	MCA	Encadrant
Pr. RAHMOUNI Zine El Abidine	Professeur	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

*A la fin de ce travail, représenté par le mémoire de fin d'études, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir aidé, et nous adressons nos plus profonds remerciements et gratitude à **Mme. DJEBRI Noura**, notre encadreur et **Mr. RAHMOUNI Zine El Abidine**, Pour leur aide et leur dévouement dans la réalisation de ce travail.*

Nous remercions le personnel universitaire et le personnel Bureau d'Études et de Recherches pour leurs éclaircissements et leur coopération avec nous.

Nous tenons également à remercier les membres du comité d'évaluation pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Au final, nous adressons nos remerciements à nos familles, amis et à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la mise en œuvre de ce travail.

Merci à tous.

Dédicace

اصابت سهامنا هذه المرة و لم تخطئ لمعت اعيننا من فرط الانتصار كتبنا في
نهاية سطورنا اننا نلنا ما صبرنا لأجله

الحمد لله

الى العزيز الذي حملت اسمه فخرا

الى من كلله الله بالهيبة و الوقار الى من حصد الاشواك عن دربي و زرع لي
الراحة بدلا منها

الى ابي لم يحن ظهر ابي ما كان يحمله لكن ليحملني من اجل ان حدبا و كنت
اخفي عن نفسي مطالبها فكان يكشف عما اشتهي الحجبا

شكرا لكونك ابي

الى من علمتني الاخلاق قبل ان اتعلمها الى الجسر الصاعد به الى الجنة الى
اليد الخفية التي ازال

عن طريقي العقبات ومن ظلت دعواتها تحمل اسمي ليلا و نهارا

امي عزيزتي

الى من وهبني الله نعمة وجودهم الى مصدر قوتي و ارضي الصلبة وجدار قلبي
المتين

كل باسمه (نبيلة . اسيا . شيماء . جنات . إبراهيم الخليل)

اخوتي و اخواتي

والى من ضاقت بي الدنيا وسعت بخطاهم و ان سقطت كانوا اول من رفعوني
بكلماتهم

الى من رافقني بالقلب قبل الدرب (نواصري محمد علي . جلال انور . خنوف
منصور . جلال عيسى . فراح يوسف . حميدي عماد الدين)

شكرا اصحابي و احبتي

الى كل من كان لنا عونا و سندا الى اصحاب النفوس الطيبة (فراح الجمعي .
غربي رضا)

ها انا اليوم طويت صفحة من التعب و سجلت في تاريخي فخرا لا ينسى لم اعد
اتساءل عن ملامح الوصول فقد رايتها في عيوني تلاشت غيوم التعب و ابتسم
الافق بعد عتمة الانتظار هاهي الخطى التي كانت تتعثر أحيانا قد وجدت
مستقرها في قمة الانجاز

و بين طيات الطريق تنفست سلاما وفرحا و امتنان

و اخر دعواهم :

الحمد لله رب العالمين

ملخص

ان استخدام الخرسانة ذاتية الرص قد شهد تطورا ملحوظا في السنوات الاخيرة، وازداد الاهتمام بدراسة خصائصها الميكانيكية والريولوجية. في الوقت الحالي تشكل النفايات الصناعية مصدرا محتملا للمشاكل البيئية والاقتصادية.

يعد دمج النفايات في تركيب الخرسانة ذاتية الرص موضوعا يستحق الدراسة يهدف هذا العمل الى تثمين النفايات الزجاجية من خلال استخدامها كبديل للرمال في الخرسانة ذاتية الرص. وذلك لتقليل التأثير البيئي وتحسين السلوك الميكانيكي للخرسانة من حيث مقاومة الانحناء والضغط بالإضافة الى دراسة سلوكها في ظل درجات الحرارة العالية من منظور الخائص الميكانيكية

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية الرص، تثمين النفايات، نفايات الزجاج، الحالة الطرية، الحالة الصلبة

Résumé

L'utilisation des Bétons autoplaçant (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques. Les déchets industriels dégagent actuellement constituant une source potentielle de problèmes environnementaux et économique.

L'incorporation des déchets dans la composition du béton autoplaçant (BAP) est un intérêt qui mérite d'être étudié.

L'objectif de ce travail, c'est la valorisation des déchets de verre en les utilisant comme substitut de sable dans le béton autoplaçant. Pour réduire l'impact environnemental et améliorer le comportement mécanique du béton à la flexion, et à la compression, ainsi que l'étude de leurs comportements vis-à-vis des hautes températures du point de vue caractéristique mécanique.

Mots clés : Béton autoplaçant, Valorisation des déchets, Déchets de verre, Etat frais, Etat durci.

Abstract

The use of Self-Compacting Concrete (SCC) has significantly developed in recent years, and increasing attention is being paid to the study of its mechanical and rheological properties. Industrial waste currently represents a potential source of environmental and economic problems.

Incorporating waste into the composition of self-compacting concrete (SCC) is an area worthy of study.

The objective of this work is to valorize glass waste by using it as a substitute for sand in self-compacting concrete. This aims to reduce environmental impact and improve the mechanical behavior of the concrete in flexion and compression, as well as to study its behavior under high temperatures from a mechanical characteristic's perspective.

Keywords: Self-Compacting Concrete, Waste Valorization, Glass Waste, Fresh State, Hardened State.

Table des matières

Remerciement	II
Dédicace	III
Table des matières	VI
Listes des figurées	XI
Listes des Tableaux	XIII
Listes des abréviations	XIV
Introduction générale	1

Chapitre I

Généralités sur le béton autoplaçant

1. Introduction :	4
2. Définition de béton auto plaçant :	4
3. Principaux constituants des BAP :	5
3.1 Matériaux de base :	5
3.1.1 Ciment :	5
3.1.2 Les granulats :	5
3.1.3 L'eau	6
3.1.4 Additions minérales :	6
3.1.5 Les fillers calcaires:	7
3.1.6 Le super plastifiant:	7
3.2 Essais de caractérisation à d'état frais	9
3.2.1 Essai évaluant la fluidité (étalement)	9
3.2.2 L'essai de boîte en L:	10
3.2.3 Essai de Stabilité au tamis:	10
3.3 caractéristiques des (BAP) à L'état durci :	11
3.3.1 La résistance mécanique :	11
3.3.2 Le module élastique :	12
4 Les Avantage de BAP : [9]	12
5 Méthodes de formulations des BAP :	13
5.1 Méthodes japonaise :	13
5.1. Méthode Suédoise :	14
5.2. Méthodes Française:	14
6 Conclusion :	15

Chapitre II

Valorisation des déchets

1. Introduction :	17
2. Recyclage des déchets :	17
2.1 Définition d'un déchet :	17
2.2 Définition de recyclage :	18
3. Origine de la production des déchets :	19
4. Les différents types de déchet :	20
4.1 Déchets ultimes :	20
4.2 Déchets inerte :	20
4.3 Déchets ménagers et assimilés ;	21
4.4 Déchets dangereux :	21
4.4.1 Déchets industriels spéciaux (DIS) :	21
4.4.2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) :	21
4.5 Déchets verts :	21
4.6 Déchets organiques ;	21
4.7 Déchets non dangereux des activités économiques :	21
4.7.1 Les déchets industriels banals (DIB) ;	21
4.7.2 Les déchets médicaux et pharmaceutiques :	22
5. Technique de recyclage :	22
5.1 Procédés du recyclage :	22
5.2 L'intérêt de la valorisation :	22
5.3 Gestion des déchets :	22
5.3.1 Collecte de déchets :	22
5.3.2 Transformations :	23
5.3.3 Commercialisation et consommation :	23
6. Principes de gestion des déchets :	23
7. Technique de gestion des déchets :	23
7.1 Décharge :	23
7.2 Incinération :	23
7.3 Compost et fermentation :	24
7.4 Traitement biologique et mécanique:	24
7.5 Pyrolyse et gazéification :	25
8. Impacts du recyclage sur l'environnement ;	25

9. Déchets utilisés comme granulâtes du béton :	26
9.1 Déchets de faïence :	26
9.2 Déchets de la démolition :	26
9.3 Déchets de Pneus :.....	27
9.4 Déchets de brique :	28
9.5 Déchets de verre :	28
9.6 Les Déchets de chantier :	29
9.7 Les Déchets de plastiques :.....	30
9.8 Les Déchets de bois :.....	31
10 Conclusion.....	32

Chapitre III

Béton autoplaçant exposé à la haute température

1. Introduction	34
2. Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées	34
2.1 Evolution de la matrice cimentaire	34
2.2 Evolution des granulats	34
3. Evolution des propriétés physiques du béton	35
3.1 Dégradation de l'interface pâte-granulats.....	35
3.2 Les modifications physico-chimiques dans le béton à haute température	35
3.3 Evolution de la porosité.....	36
3.4 Evolution de la masse volumique	37
3.5 Perte de masse	38
3.6 Evolution de la perméabilité.....	38
4. Evolution des propriétés mécaniques avec la température	38
4.1 Résistance en compression à haute température	38
4.2 Résistance en traction à haute température.....	39
4.3 Module d'élasticité.....	40
5. Conclusion.....	41

Chapitre IV

Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

1. Introduction	43
2. Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du BAP:	43
2.1 Le sable.....	43
2.1.1 Analyse granulométrique: [NF EN 933-1]	43

2.1.2 Caractéristiques physiques du sable	45
2.1.2.1 La masse volumique absolue: [NF EN 1097-7]	45
2.1.2.2 La masse volumique apparente: [NF EN 1097-6]	46
2.1.2.3 Equivalent de sable : [NF EN 933-8].....	46
2.2. Le gravier	49
2.2.1 Analyse granulométrique.....	49
2.2.2 Caractéristiques physiques du gravier	50
2.2.2.1 La masse volumique apparente : [NF P 18-554]	50
2.2.2.2 La masse volumique absolue du gravier	51
2.3 Le ciment :.....	52
2.4. Les adjuvants	53
2.5 Déchets de verre	53
2.5.1 Analyse granulométrique du verre	53
2.5.2 Caractéristiques physiques du verre	54
2.5.2.1 La masse volumique absolue.....	54
2.5.2.2 La masse volumique apparente	55
2.6 Le filler (marbre).....	55
2.7. L'eau de gâchage.....	56
3. Formulation du béton auto plaçant.....	57
3.1. Préparation de la gâchée.....	57
3.2. Conservation des éprouvettes.....	57
3.3. Formulation de béton auto plaçant.....	58
3.3.1 Les constituants présents dans le mélange.....	58
3.3.2 Les déchets de verre	59
3.3.3 Les compositions des différents bétons.....	59
4. Conclusion.....	60

Chapitre V

Techniques expérimentales des BAP

1. INTRODUCTION.....	62
2. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état frais :.....	62
2.1 Détermination de la consistance au cône d'Abrams : NF EN 12 350-8.....	62
2.1.1 Matériel utilisé	62
2.1.2 Mode opératoire.....	62
2.2 Détermination du risque de blocage à l'aide de la boîte L : NF EN 12 350-10	63

2.2.1 Objet de boîte en L.....	64
2.2.2 Mode opératoire	64
2.3 Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis :	
NF EN 12 350-11	64
2.3.1 Matériel utilisé.....	64
2.3.2 Mode opératoire.....	64
2.4 La masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6]:.....	65
3. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état durci :.....	65
3.1 Essai de compression : NF EN 12390-3.....	65
b. Principe de l'essai.....	65
3.2 Essai de flexion : NF EN 12390-5.....	66
a. But de l'essai.....	66
4. Conclusion.....	68

Chapitre VI

Résultats et Discussions

1. Introduction	70
2. Résultats des essais à l'état frais	70
1.1 Essai d'étalement au cône d'Abram's.....	70
1.2 Essai de stabilité au tamis	71
1.3 Essai de la boîte en L	71
1.4 La masse volumique.....	72
2. Résultats des essais à l'état durci.....	72
2.1 La résistance à la compression.....	73
2.2 La résistance à la traction par flexion.....	73
2.3 La perte de masse	74
3. Comportement du verre utilisé dans le béton à la haute température	74
4. Conclusion.....	75
Conclusion générale	77
Références Bibliographiques	78
Annexe	83

Listes des figurées

Fig.I.1. Comparaison de la structure d'un BAP d'un BO [2].....	4
Fig.I.2 Représentation schématique des molécules de base super plastifiants les plus connus [2]	7
Fig.I. 3 Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton	8
Fig.I. 4 Pâte de ciment non adjuvantée[7]	8
Fig.I. 5 Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant[7].....	8
Fig.I. 6 Essai d'étalement au cône d'Abrams [2].	9
Fig.I. 7 Représentation schématiques de l'essai d'étalement[6].....	9
Fig.I. 8 Représentation schématique de l'essai à la boîte en L [2].....	10
Fig.I. 9 Essai stabilité de tamis. [2]	11
Fig.I. 10 Résistance en compression de différents mélanges.....	12
Fig.II. 1 Stratégies de traitement des déchets. [4].....	19
Fig.II. 2 Valorisation des déchets [5].	19
Fig.II. 3 déchets de faïence [10].....	26
Fig.II. 4 Déchets de démolition [10].....	27
Fig.II. 5 Déchets de Pneus.[12]	28
Fig.II. 6 déchets de Brique.[10]	28
Fig.II. 7 déchets de verre [9].....	29
Fig.II. 8 Les déchets de chantier [10]	30
Fig.II. 9 différent type de déchet plastique [15].....	31
Fig III. 1. Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement . [3]	37
Fig III. 2. Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.[1].....	37
Fig III. 3. Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température [2]	38
Fig III. 4. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [1].	39
Fig III. 5. Comportement du béton en traction (contrainte-ouverture de fissure) à différentes températures [3].....	40
Fig III. 6. Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température.....	41
Fig IV. 1 Matériels utilisé pour l'analyse granulométrique	44
Fig IV. 2 Courbe granulométrique du sable	45

Fig IV. 3. Essai d'équivalent de sable	47
Fig IV. 4 Courbe granulométrique de Gravier (8/16).....	49
Fig IV. 5 Courbe granulométrique de Gravier (3/8)	50
Fig IV. 6 ciment (ciment Biskria)	52
Fig IV. 7 Courbe granulométrique du verre	54
Fig V. 1 Essai d'étalement.....	63
Fig V. 2 Essai de la boîte L	63
Fig V. 3 Blocage des granulats par la présence d'armatures [1]	63
Fig V. 4 Essai de la stabilité au tamis	65
Fig V. 5 L'appareil de l'essai de compression.....	66
Fig V. 6 L'appareil de l'essai de traction par flexion	67
Fig V. 7 Formule de calcul de la résistance de flexion.....	67
Fig VI. 1 L'étalement en fonction de type de béton	70
Fig VI. 2 L'indice de ségrégation en fonction de types de béton	71
Fig VI. 3 Le taux de remplissage en fonction de type de béton	71
Fig VI. 4 La masse volumique en fonction des types bétons (BAP)	72
Fig VI. 5 La résistance à la compression en fonction de l'âge de béton.....	73
Fig VI. 6 La résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des bétons	73
Fig VI. 7 La perte de masse.....	74
Fig VI. 8 Verre après exposition à la température 400°C	75
Fig VI. 9 Verre après exposition à la température 200°C	75
Fig VI. 10 Verre après exposition à la température 600°C	75

Listes des Tableaux

Tableau III. 1. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température[4].....	36
Tableau IV. 1 Analyse granulométrique du sable	44
Tableau IV. 2 la masse volumique absolue du sable :.....	45
Tableau IV. 3 La masse volumique apparente à l'état lâche VR=1000 ml.....	46
Tableau IV. 4. Equivalent de sable.....	48
Tableau IV. 5 La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).[3]	48
Tableau IV. 6 Analyse granulométrique du gravier 8/16	49
Tableau IV. 7 Analyse granulométrique du gravier 3/8	50
Tableau IV. 8 la masse volumique apparente du gravier :	51
Tableau IV. 9 la masse volumique absolue du gravier :.....	51
Tableau IV. 10 caractéristique technique	52
Tableau IV. 11 Analyse granulométrique du verre :	54
Tableau IV. 12 la masse volumique absolue du verre :.....	55
Tableau IV. 13 La masse volumique apparente du verre à l'état lâche VR=1000ml.....	55
Tableau IV. 14 Caractéristiques physiques du marbre	56
Tableau IV. 15 Caractéristiques chimiques du marbre.....	56
Tableau IV. 16 Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage	56
Tableau IV. 17 La composition des matériaux pour 1m ³ de béton.....	59
Tableau V. 1 Classement de la formulation selon le pourcentage.....	65
Tableau VI. 1 Résultats des essais à l'état frais.....	70
Tableau VI. 1 Comportement du verre à haute température	74

Listes des abréviations

BAP : Béton autoplaçants

BO : Béton ordinaire

BHP : bétons haute performance

CEM I : le ciment Portland(CPA)

S : Surface de l'éprouvette en (cm²)

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

ρ_{app} : La masse volumique apparente (Kg/m³)

S : Surface de l'éprouvette en (cm²)

F : force au moment de la rupture

C : Ciment

S : Sables

G 3/8 : gravier 3/8

G 8/16 : gravier 8/16

V_r : Volume de récipient (cm³)

M₁ : Poids de récipient

M₂ : Poids de l'ensemble (granulat + récipient)

V₁ : volume d'eau

V₂ : le nouveau volume d'eau

ESV : Equivalent de sable visuel en (%)

ESP : Equivalent de sable piston en (%)

h₁ : Hauteur (sable + flocculat)

h₂ : Hauteur du sable en (cm)

h'₂ : la hauteur du sable

E/C : Rapport massique Eau sur Ciment

G/S : Rapport sable sur gravier

NF : Norme française

EN : Norme européenne

K : Clinker

DMA : déchets ménagers et assimilés

DND : les déchets non dangereux

OM : les ordures ménagères

DIS : Déchets industriels spéciaux

DMS : Déchets ménagers spéciaux

DIB : Les déchets industriels banals

TBM : Le traitement biologique et mécanique

TMB : traitement mécanique et biologique

Introduction Générale

Introduction générale

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus importants utilisés dans le monde entier, notamment dans les projets tels que les bâtiments, les ponts, les routes et de nombreuses autres infrastructures vitales. Avec le développement croissant des techniques de construction, de nouveaux types de béton ont vu le jour pour répondre aux exigences de performance et de qualité, dont le béton autoplaçant, qui se distingue par sa grande fluidité.

Les bétons auto plaçant ou BAP sont des bétons très fluides, homogènes et stables, ils sont mis en œuvre sans vibration, ce qui est un grand avantage pour la réalisation de bâtiments, les bétons auto plaçant (BAP) peuvent remplir des coffrages complexes, où la densité est importante pour le ferrailage [1]

La contribution au recyclage et à la valorisation des déchets inorganiques en particulier, les déchets de l'industrie de verre (déchets de verre) dans la fabrication de certains bétons permettant ainsi de les éliminer ou au moins de les minimiser. En plus de la protection de l'environnement, cette initiative conduit aussi à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats à savoir les granulats traditionnels (sable et gravillon). [2]

Les défis se complexifient lorsque le béton est exposé à des températures élevées, car la chaleur affecte considérablement ses propriétés physiques et mécaniques. Cela nécessite donc une étude approfondie du comportement du béton auto-plaçant contenant des déchets de verre soumis à des conditions thermiques sévères, afin de garantir sa durabilité et ses performances dans diverses applications d'ingénierie.

Cette étude expérimentale vise à évaluer l'effet de l'ajout de déchets de verre dans la formulation du béton autoplaçant (10%,20%,30%), ainsi qu'à étudier son comportement et sa durabilité lorsqu'il est soumis à des températures élevées (200°,400°,600°). L'étude explore également les propriétés physiques et mécaniques du béton à l'état frais et durci, en mettant l'accent sur l'amélioration de la qualité du béton et la réduction de l'impact environnemental des déchets de verre.

Cette mémoire est divisée en six chapitres comme suit:

1er Chapitre : Généralités sur le béton autoplaçant :

Revue Générales Sur Le Béton Autoplaçant présente une synthèse bibliographique sur les BAP d'un point de vue générale. Les informations présentées relatent plusieurs aspects concernant la caractérisation des propriétés intrinsèques aux BAP. Les particularités de la composition des BAP et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) sont abordées

2ème Chapitre : Valorisation des déchets :

Est consacré à la valorisation des déchets, leurs natures et leurs provenances ainsi les différents déchets utilisés en génie civil principalement dans l'élaboration des bétons et des ciments composés.

3ème Chapitre : Béton autoplaçant exposé à la haute température :

Revue générale sur le béton autoplaçant exposé à haute température.

4ème Chapitre: Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton :

Est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler, superplastifiants, déchets de verre, sable et gravier 3/8 et 8/16) et à l'étude expérimentale, dans laquelle nous présentons les matériaux et le matériel utilisé dans notre travail.

5ème Chapitre : techniques expérimentales des BAP :

Est la partie expérimentale, où on s'intéresse à la formulation des bétons autoplaçant, à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

6ème Chapitre : Résultats et Analyses :

Est consacré aux résultats et analyses obtenus lors de cette étude. Ainsi que les propriétés mécaniques et physiques d'un BAP

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre I
Généralités sur le béton
autoplaçant

1. Introduction :

Les bétons autoplaçants (BAP, ou SCC, en anglais, self compacting concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores. [1]

Ces bétons se développent maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : possibilité de bétonner des zones fortement ferraiillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du parement (pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers) d'une part, diminution du temps et de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.[1]

Cette partie présente un aperçu détaillé du béton auto-plaçant (BAP), un matériau innovant dans le domaine de la construction. Nous y aborderons sa définition, une description synthétique de ses constituants, ainsi que ses principales caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. Enfin, cette section mettra en lumière les innovations techniques et les avantages que présente le BAP.

2. Définition de béton auto plaçant :

Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferraiillés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'auto-plaçant que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (pas de ségrégation) et présent de très bonne performance à court et puis à long terme. [9]

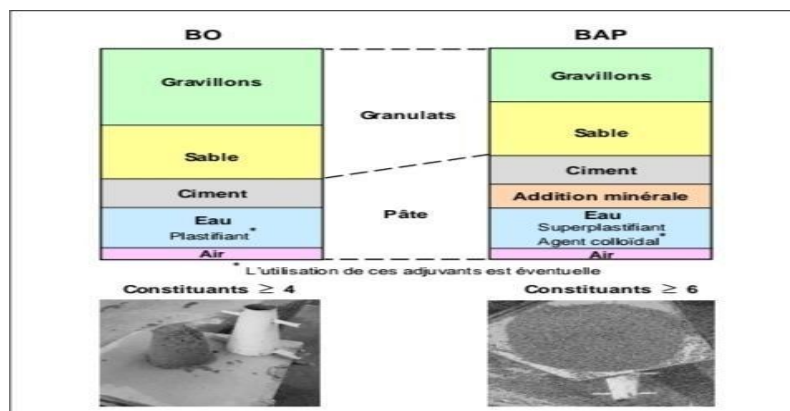


Fig.I.1. Comparaison de la structure d'un BAP d'un BO [2]

3. Principaux constituants des BAP :

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Etant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques [3].

3.1 Matériaux de base :

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP. [9].

3.1.1 Ciment :

Ciment selon la norme **NF EN 197-1**, dit ciment **CEM**, avec Agrégat et correctement mélangé avec de l'eau, doit être capable de produire du mortier ou Béton qui conserve sa maniabilité suffisamment longtemps. [5]

Composé principalement de clinker de silicate (K), un matériau à prise hydraulique, obtenu Cuisson à feu vif, au-dessus de 1450°C, avec le bon mélange Le ratio moyen de calcaire et d'argile est de 80% et 20% [5]. Silicates et aluminates La force hydraulique formée lors de la combustion (clinker) est [5] :

- Le silicate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, que l'on écrit C3S.
- Le silicate bicalcique, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, que l'on écrit C2S.
- L'aluminate tricalcique, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C3A.
- L'aluminoferrite tetracalcique, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C4AF.

En principe, tous les types de ciment standardisés conviennent à la production de **BAP**. Cependant, en utilisant du ciment Portland (c'est-à-dire **CPA-CEM I 42.5**, qui contient au moins 95 % de clinker), nous donnant une liberté totale de changer et de contrôler l'introduction Additifs minéraux. [7]

3.1.2 Les granulats:

De déterminer leur granulométrie permettant de minimiser le plus possible le volume d'air dans le but d'améliorer les propriétés du béton.

Les granulats se divisent principalement en deux catégories soient les gravillons ($\phi > 5\text{mm}$) et le sable ($\phi \leq 5$).

Dans le cas des BAP, les gravillons sont essentiellement caractérisés par leur dimension maximale, cette dimension étant principalement limitée à 20mm afin d'empêcher le risque de blocage lors de la mise en place. Les gravillons roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés.

En outre, le sable Recommandé à la confection des BAP doit comporter des quantités assez fortes d'éléments fins ($\phi \geq 0.125\text{mm}$), dans la plage de 4 à 8%. Ainsi, ses grains passants au tamis de 2mm doivent être compris entre 38 et 42% [2].

Cette optimisation de sable permet d'améliorer le comportement rhéologique des BAP, mise elle entraîne un surcoût supplémentaire. [9]

3.1.3 L'eau

La quantité de l'eau joue un rôle primordial sur la qualité finale : les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton. Elles peuvent aussi provoquer des taches à la surface du béton ou même favoriser la corrosion des armatures. Pour ces raisons, la qualité de l'eau de gâchage ou celle utilisée pour le mûrissement doit être contrôlée. [5] L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [8] :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants. [8]

3.1.4 Additions minérales:

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu depuis l'Antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées. [9]

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP [4] :

1. Les fillers calcaires

2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes

3.1.5 Les fillers calcaires:

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80µm, sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaire naturelles ou non. ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation.[9]

3.1.6 Le super plastifiant:

A l'état frais : les BAP requièrent habituellement une grande quantité de super plastifiant. Leur dosage varie entre 3l/m³ à près de 20l/m³ pour les mélanges de béton dont la courbe granulométrique est médiocre. Cependant, l'utilisation explicite de leur grande maniabilité [1].

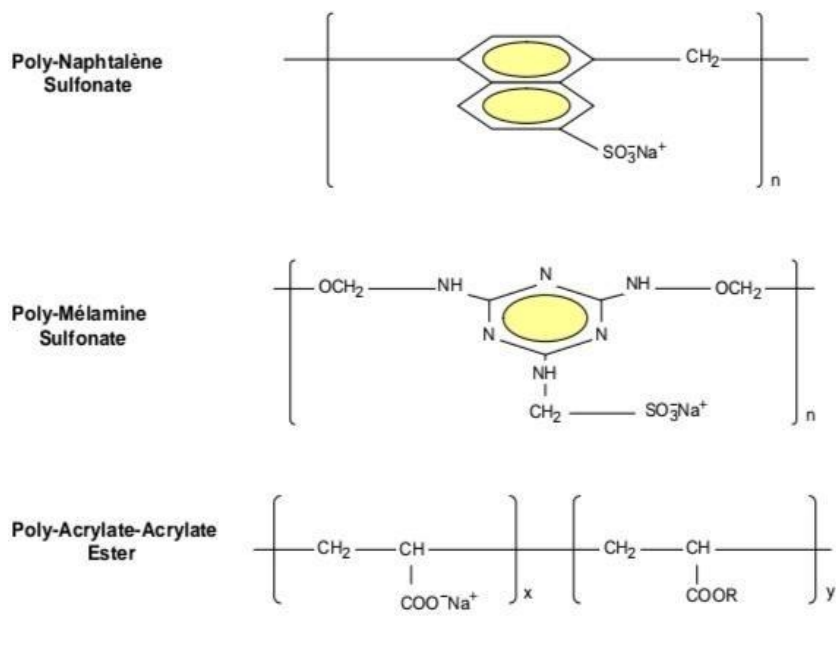


Fig.I.2 Représentation schématique des molécules de base super plastifiants les plus connus [2]

L'ajout d'un super plastifiant aide à augmenter la fluidité la figure I.3 montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à part d'un certain dosage en super plastifiant [4]

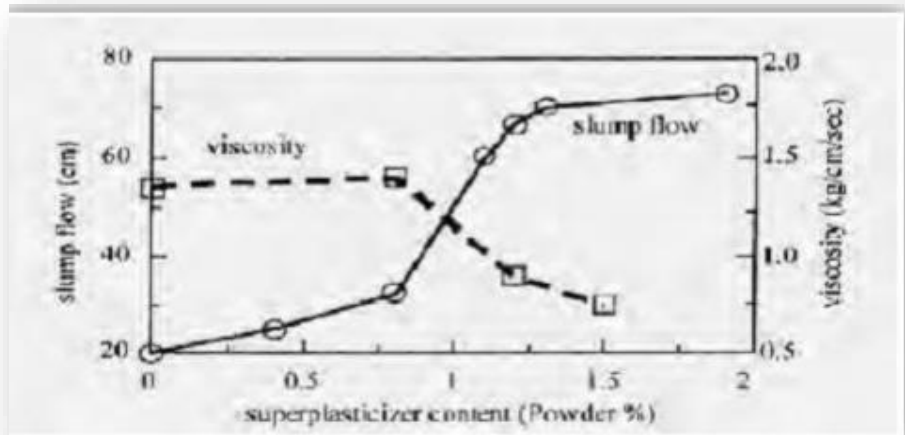
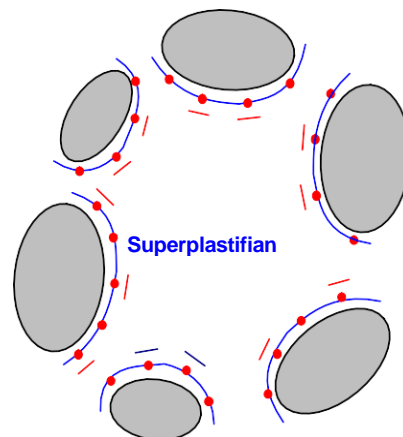
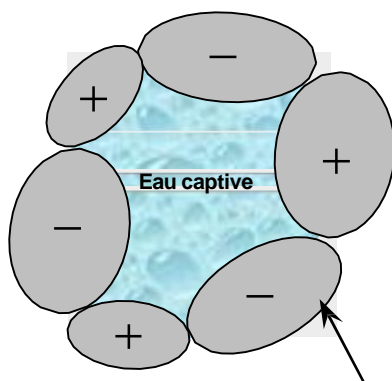


Fig.I. 3 Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton[4]

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton (figure 1.4).

Les super plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité (figure 1.5).[6]



Grains de ciment

Fig.I. 4 Pâte de ciment non adjuivée[7]

Fig.I. 5 Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant[7]

3.2 Essais de caractérisation à l'état frais

3.2.1 Essai évaluant la fluidité (étalement)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP. Il s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'asrams. Cependant, l'affaissement est toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. [6]

Ce diamètre, appelé étalement D, donne une indication sur la mobilité du BAP dans un milieu non confiné. Les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans fourchette 60 à 75cm [6]

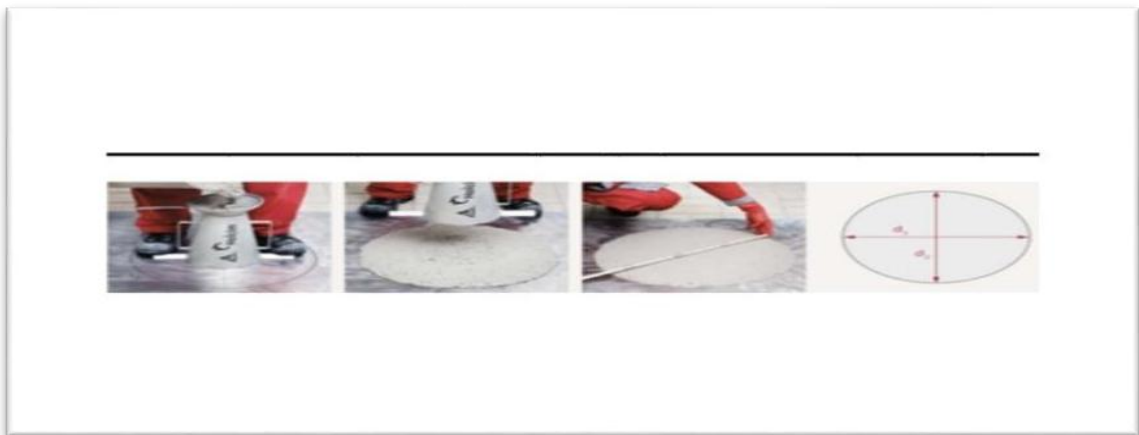


Fig.I. 6 Essai d'étalement au cône d'Abrams [2]

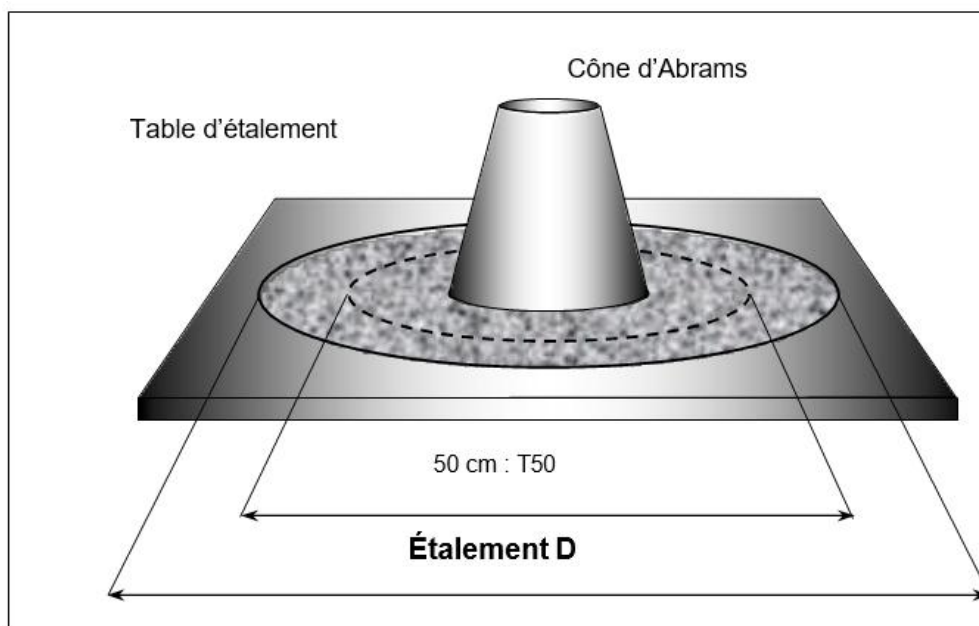


Fig.I. 7 Représentation schématiques de l'essai d'étalement[6]

3.2.2 L'essai de boîte en L:

Pour tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm. On mesure les hauteurs H et on exprime le résultat en matière de taux de remplissage H_2/H_1 (Fig1.8) [3].

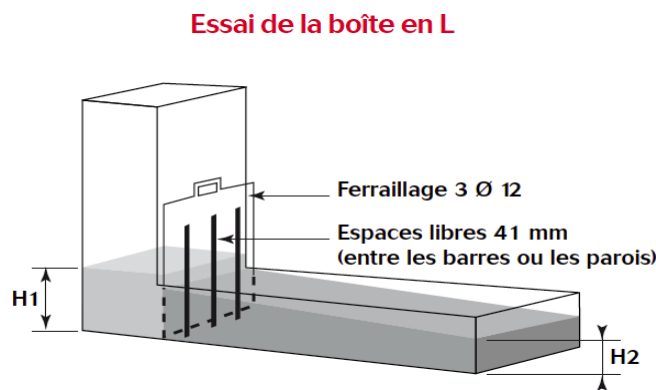


Fig.I. 8 Représentation schématique de l'essai à la boîte en L [2].

3.2.3 Essai de Stabilité au tamis:

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure I. 9). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur le chantier. [8]

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes : [8]

- $0\% \leq \% P \text{ laitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante ;
- $15\% < \% P \text{ laitance} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ;

➤ % P laitance > 30 % : stabilité très mauvaise: ségrégation systématique, béton inutilisable.

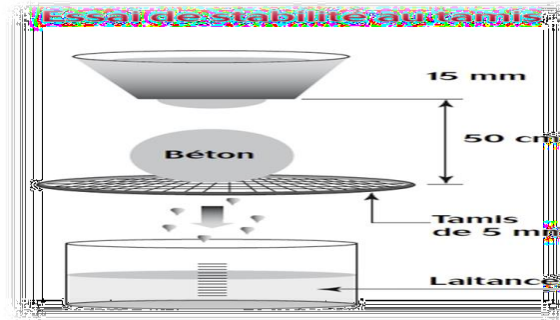


Fig.I. 9 Essai stabilité de tamis. [2]

3.3 caractéristiques des (BAP) à L'état durci :

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment. [4]

3.3.1 La résistance mécanique:

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable) [10].

D'une façon expérimentale les BAP impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques. [7]

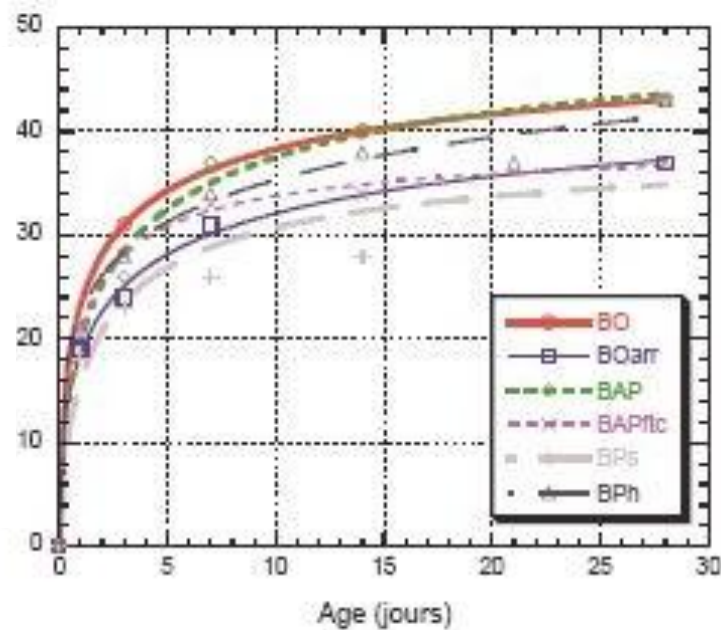


Fig.I. 10 Résistance en compression de différents mélanges[1]

3.3.2 Le module élastique:

Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle. Ont montré que les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comparable ment au BHP, ce qui confirme cette idée à également trouver que le module élastique d'un BAP est systématiquement inférieur à celui du BO dérivé. Mais la différence n'est pas très importante, puisqu'elle se situe entre 2 et 8% [10].

Rapporté par trouvent que le module élastique des deux types de béton (BO et BAP) est très proche .[7]

De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie ,et en second lieu, d'inclusion des granulats. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les granulats, les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montrent qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance.[7]

4 Les Avantages de BAP : [9]

a) Avantages techniques :

- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés

- Réalisation d'éléments de forme complexe

b) Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages écologiques :

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

5 Méthodes de formulations des BAP :

5.1 Méthodes japonaise :

Méthodes basées sur l'optimisation du mortier :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'université de Köchi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pate au détriment des granulats. LES Bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Le surcout engendré sur le matériau est compensé, au japon, par les économies sur la main- d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a. Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m^3 de béton est limité de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume totale du système grains +vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi des mesures en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0.57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en, 10/ 14[1]

b. Dosage du sable :

Le volume du sable est de 40% du volume de mortier en béton. En réduisant la friction granulaire, la liquidité en béton est garantie.

c. Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes. Les rapports massiques eau

sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance. [1]

d. Dosage d'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. Nous réalisons des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. [1]

5.1. Méthode Suédoise :

La méthode suédoise est proposée par Peterson et al en 1996. Elle est basée sur l'étude effectuée par Tang et al en 1995. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport (G/S) final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat. [1]

5.2. Méthodes Française:

Méthode française proposée par De Larraz et al en 1994, au LCPC. Un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange.

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- Les distributions granulaires,
- Les proportions du mélange,
- La compacité propre,
- La densité apparente.

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

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple);
- Le dosage, à saturation, du super plastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente ;

- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du super plastifiant) est déterminé.
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).
- La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104, la teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion (liant/filler) est maintenue constante. Les proportions (granulats/ phase liante) sont optimisées.
- Une formulation de béton auto plaçant est donc proposée, basée sur les prévisions du modèle.
- La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en super plastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton auto plaçant sont atteintes. [1]

6 Conclusion :

Cette étude bibliographique a permis de faire le point sur les connaissances liées à la formulation et aux caractéristiques des bétons auto plaçants (BAP), tant à l'état frais qu'à l'état durci, en les comparant aux bétons traditionnels.

Le BAP est un béton capable de se mettre en place uniquement sous l'effet de la gravité, sans vibration ni compactage. Ses propriétés à l'état frais se distinguent par :

- Une grande fluidité,
- Une viscosité adaptée évitant toute ségrégation,
- Une capacité à remplir complètement le coffrage, même en présence de ferrailage dense.

Un béton est qualifié d'auto plaçant lorsque trois critères sont respectés :

1. Mobilité en milieu non confiné
2. Mobilité en milieu confiné
3. Stabilité du mélange

Enfin, les avantages et les principales méthodes de formulation du BAP ont été présentés, soulignant l'intérêt croissant de cette technologie dans le secteur du bâtiment



Chapitre II
Valorisation des déchets

1. Introduction :

Du fait de l'augmentation des activités du Bâtiment et des Travaux Publics depuis quelques décennies, on constate un afflux croissant du volume des déchets issus des chantiers. L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais. La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique [1]. Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer son traitement. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir ».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir. « Toute personne qui produit ou détient des déchets, dans des Conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, **est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination** conformément aux dispositions du Code de l'Environnement, dans des conditions propres à éviter les dits effets. » [2]

Dans ce chapitre, nous allons parler sur la gestion des différents types de déchets et les techniques de traitement ou d'élimination ; ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine de génie civil

2. Recyclage des déchets:

2.1 Définition d'un déchet:

Selon l'article L541-1-1 du Code de l'Environnement, un déchet est défini comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». En fonction de leurs types et de leurs origines, les déchets ont un niveau de dangerosité variable qui, dans certains cas, peut être préjudiciable à l'homme et à l'environnement. [3]

Les déchets peuvent être classés en trois catégories :

- Les déchets dangereux, qui présentent une ou plusieurs propriétés dangereuses (comburant, inflammable, explosif, corrosif, cancérogène...) (décret n° 2002-540 du 18 avril 2002),[1]

- Les déchets non dangereux, qui ne figurent pas dans le **décret n° 2002-540 du 18 avril 2002**, [1]
- Les déchets inertes, qui ne sont pas dangereux et ne contiennent pas de constituants évolutifs. Ils « ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine » (**directive n° 1999/31/CE**). Ils proviennent essentiellement du secteur du BTP.
- Anciennement appelés déchets ménagers et assimilés (DMA) (arrêté du 19 janvier 2006), les déchets non dangereux (DND) regroupent tous les déchets, dont l'innocuité est garantie, en provenance de l'intégralité des activités économiques et des ménages. [1]

2.2 Définition de recyclage:

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. [4]

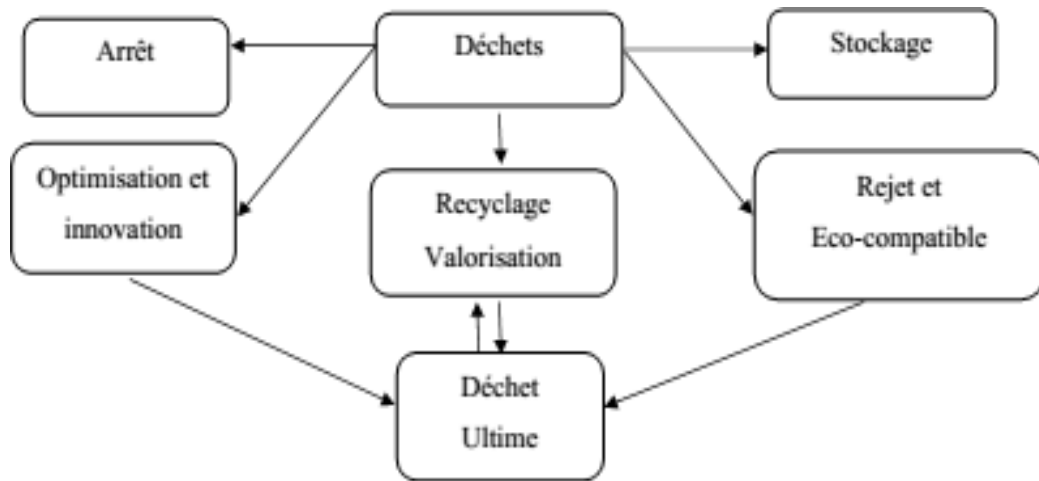


Fig.II. 1 Stratégies de traitement des déchets. [4]

Leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques, elles articulent autour des objectifs généraux suivants [4] :

- Valorisation énergétique.
- Valorisation en matière première organique et minérale.
- Valorisation en science des matériaux.
- Valorisation en agriculture.
- Valorisation en technique de l'environnement.
- Technique dite d'élimination.

Les objectifs précédents sont illustrés dans la fig II. 2:

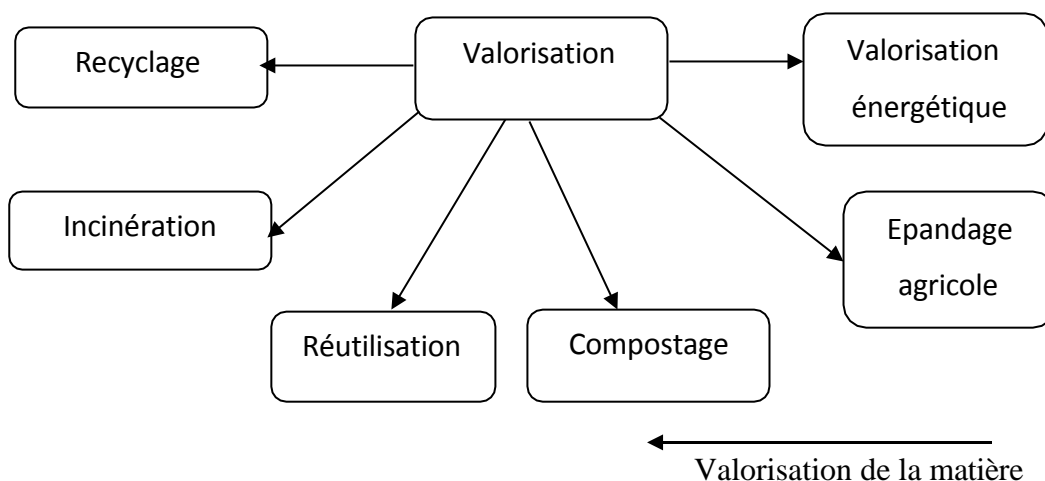


Fig.II. 2 Valorisation des déchets [5].

3. Origine de la production des déchets :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;

- Chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- Économiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- Écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- Accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets. [5]

4. Les différents types de déchet :

4.1 Déchets ultimes:

le déchet ultime est une sorte de déchet qui n'a plus de possibilité d'être traité dans les conditions techniques et économiques actuelles, notamment en extrayant des pièces recyclables ou en réduisant leur pollution ou leurs caractéristiques dangereuses [6].

4.2 Déchets inerte:

Déchets qui subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décompose pas, ne brule pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux [5].

Ce sont notamment les déchets suivants :

- Les bétons (armés ou non),
- Les tuiles et céramiques,
- Les briques, Le verre,
- Les terres et granulats non pollués et sans mélange,
- Les enrobés bitumineux sans goudron,
- Les isolants minéraux (laine de verre, de roche, de laitier, verre expansé). [4]

4.3 Déchets ménagers et assimilés ;

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants). [5]

4.4 Déchets dangereux:

4.4.1 Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc....[5]

4.4.2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé.[5]

4.5 Déchets verts :

Ce sont les déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages...) [5]

4.6 Déchets organiques ;

Les termes suivants recouvrent la même notion : biodéchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de

- Déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)
- Déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc....- boues [4]

4.7 Déchets non dangereux des activités économiques:

Il s'agit de déchets d'entreprises qui s'apparentent, par leur nature et leur composition, aux déchets ménagers tels que les déchets liés aux activités de commerce, les déchets de construction et les déchets desservies publics (école, administration, etc.). La loi considère d'ailleurs qu'ils sont « assimilables aux déchets ménagers » et peuvent ainsi être collectés et éliminés comme des déchets ménagers [7].

4.7.1 Les déchets industriels banals (DIB) ;

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.[4]

4.7.2 Les déchets médicaux et pharmaceutiques:

Tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires. [7]

5. Technique de recyclage :

5.1 Procédés du recyclage:

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. [4] Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz. [4]

5.2 L'intérêt de la valorisation:

POURQUOI VALORISER ? Pour porter de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous-produits industriels est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. [4] Les arguments peuvent être résumés en :

- Augmentation de la production.
- Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Une meilleure gestion de la recherche.

5.3 Gestion des déchets:

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. [4]

5.3.1 Collecte de déchets:

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les

déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence.

La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations. [4]

5.3.2 Transformations:

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi. [4]

5.3.3 Commercialisation et consommation:

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et Consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés. [4]

6. Principes de gestion des déchets:

Il y a plusieurs principes qui guident la gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) : [9]

- Réduire.
- Réutiliser.
- Recycler.

7. Technique de gestion des déchets:

7.1 Décharge:

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de stockage des déchets, et reste la pratique la plus courante dans la plupart des pays. Historiquement, les décharges étaient souvent établies dans des carrières, des mines ou des trous d'excavation désaffectés. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets ; néanmoins une méthode plus efficace sera sans aucun doute requise lorsque les espaces libres appropriés diminueront. [5]

7.2 Incinération:

L'incinération est le processus de destruction d'un matériau en le brûlant. L'incinération est souvent appelée « Énergie à partir des déchets » ou « des déchets vers l'énergie » ; ces

appellations sont trompeuses puisqu'il y a d'autres façons de récupérer de l'énergie à partir de déchets sans directement les brûler (voir fermentation, pyrolyse et gazéification).[4] Elle est connue pour être une méthode pratique pour se débarrasser des déchets contaminés, comme les déchets médicaux biologiques. Beaucoup d'organisations utilisent aujourd'hui l'exposition des déchets à haute température pour les traiter thermiquement (cela inclut aussi la gazéification et la pyrolyse). [4] Cette technique inclut la récupération du métal et de l'énergie des déchets solides municipaux comme le stockage adapté des résidus solides (mâchefers) et la réduction du volume des déchets. [4]

L'incinération est une technique éprouvée et répandue, en Europe comme dans les pays en voie de développement, même si elle est soumise à controverse pour plusieurs raisons. [4]

7.3 Compost et fermentation:

Les déchets organiques, comme les végétaux, les restes alimentaires, ou le papier, sont de plus en plus recyclés. Ces déchets sont déposés dans un composteur ou un digesteur pour contrôler le processus biologique de décomposition des matières organiques et tuer les agents pathogènes. [4] Le produit organique stable qui en résulte est recyclé comme paillis ou terreau pour l'agriculture ou le jardinage. Il y a un très large éventail de méthodes de compostage et de fermentation qui varient en complexité du simple tas de compost de végétaux à une cuve automatisée de fermentation de déchets domestiques divers. [4] Ces méthodes de décomposition biologique se distinguent en aérobie, comme le compost, ou anaérobie, comme les digesteurs, bien qu'il existe aussi des méthodes combinant aérobie et anaérobie. [4]

7.4 Traitement biologique et mécanique:

Le traitement biologique et mécanique (TBM) est une technique qui combine un tri mécanique et un traitement biologique de la partie organique des déchets municipaux. Le TBM est aussi parfois appelé TMB (traitement mécanique et biologique) cela dépend de l'ordre dans lequel s'effectuent les opérations. [4] La partie « mécanique » est souvent une étape de tri du vrac. Cela permet de retirer les éléments recyclables du flux de déchets (tels les métaux, plastiques et verre) ou de les traiter de manière à produire un carburant à haute valeur calorifique nommé combustible dérivé des déchets qui peut être utilisé dans les fours des cimenteries ou les centrales électriques. La partie « biologique » réfère quant à elle à une fermentation anaérobique ou au compostage.

La fermentation anaérobique détruit les éléments biodégradables des déchets pour produire du biogaz et du terreau. Le biogaz peut être utilisé pour créer de l'énergie renouvelable. La partie « biologique » peut aussi faire référence à une étape de compostage.

Dans ce cas les composants organiques sont traités par des micro-organismes à l'air libre. Ils détruisent les déchets en les transformant en dioxyde de carbone et en compost. Il n'y a aucune énergie produite par le compostage. TBM est de plus en plus reconnu comme une méthode efficace dans les pays où les techniques de gestion des déchets évoluent comme le Royaume-Uni ou l'Australie, pays où la compagnie WSN Environmental solutions a pris une position majeure dans le développement des usines de type TBM. [4]

7.5 Pyrolyse et gazéification:

La pyrolyse et la gazéification sont deux méthodes liées de traitements thermiques où les matériaux sont chauffés à très haute température et avec peu d'oxygène. Ce processus est typiquement réalisé dans une cuve étanche sous haute pression. Transformant les matériaux en énergie cette méthode est plus efficace que l'incinération directe, plus d'énergie pouvant être récupérée et utilisée. [4] La pyrolyse des déchets solides transforme les matériaux en produits solides, liquides ou gazeux. L'huile pyrolytique et les gaz peuvent être brûlés pour produire de l'énergie ou être raffinés en d'autres produits. [4] Les résidus solides (charbon) peuvent être transformés plus tard en produits tels les charbons actifs. La gazéification est utilisée pour transformer directement des matières organiques en un gaz de synthèse appelé syngaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. [4] Ce gaz est ensuite brûlé pour produire de l'électricité et de la vapeur. La gazéification est utilisée dans les centrales produisant de l'énergie à partir de la biomasse pour produire de l'énergie renouvelable et de la chaleur. [4]

8. Impacts du recyclage sur l'environnement ;

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières. Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- Chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité (É) ;
- L'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

- Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 kWh d'électricité (É) en plus de 15 g de bois.[5]

9. Déchets utilisés comme granulats du béton :

9.1 Déchets de faïence:

Les faïences peuvent être définies comme des produits céramiques dont la pâte poreuse. Et pas conséquent perméable. Et recouverte d'une composition vitrifiable destinée à remédier à cette perméabilité. [10]

Les déchets de faïence sont des matériaux inertes ou résidus qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. [10]

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries fabrication de matériaux de construction.



Fig.II. 3 déchets de faïence [10]

9.2 Déchets de la démolition:

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen

pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers. [10]

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf. [10]

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités du maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton.[10]



Fig.II. 4 Déchets de démolition [10]

9.3 Déchets de Pneus:

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité. [12]



Fig.II. 5 Déchets de Pneus.[12]

9.4 Déchets de brique:

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [11].



Fig.II. 6 déchets de Brique.[10]

9.5 Déchets de verre:

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes. Le problème environnemental que posent les déchets non biodégradables

tels que les bouteilles non réutilisables (verre) devient une préoccupation majeure au regard des quantités énormes produites dans les grandes villes. L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les stocker dans les procédés de construction (béton). Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique. Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales : les granulats (taille > 4mm) et les poudres (taille < 4mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment comme fines. [9]



Fig.II. 7 déchets de verre [9]

9.6 Les déchets de chantier:

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [13].

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est

considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé [14].



Fig.II. 8 Les déchets de chantier [10]

9.7 Les déchets de plastiques:

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Il existe plusieurs types de déchets plastiques :

- Les déchets plastiques industriels : il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets fins (principalement trouvé dans la filière de la plasturgie).
- Les déchets de production : ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisations, des purges de réacteurs et des lots déclassés. ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PS, PVC).
- Les déchets de transformation : ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage...). On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine. [15]



Fig.II. 9 différent type de déchet plastique [15]

9.8 Les déchets de bois:

Le bois manufacturé représente la plus grande partie du bois que nous utilisons et qui se termine toujours en déchet. Il n'est pas réutilisable principalement en raison des produits de protection, de conservation ou d'habillage (peinture et vernis...) qui sont utilisés pendant toute sa vie. Ses seules la réutilisation, de façon marginale, sont les panneaux de particules que l'on obtient la aussi avec de la colle et des produits injectés. [10]

Le bois en fin de vie devrait être pour destruction, en centrale spécifique comme le demande certains textes officiels, mais ce n'est qu'un rêve de le croire. Il est très souvent brûlé soit dans vos cheminées soit dans les centrales ou les produits nocifs sont soit éjectés dans l'atmosphère, soit stockés sans réutilisation en décharge (sauvage ...) et cela rarement pour le bien de notre santé. [10]



Figure II.10 différent type de déchet de bois [10]

10 Conclusion

- Les déchets représentent un véritable défi, profondément enraciné dans l'ensemble des systèmes biologiques ainsi que dans toutes les activités humaines, qu'elles soient industrielles, agricoles ou urbaines. Face à cette problématique croissante, il devient impératif de développer des solutions efficaces visant à réduire leur impact.
- L'utilisation des déchets varie selon leur rentabilité économique et leurs propriétés spécifiques. Cependant, certains types de déchets demeurent difficilement exploitables en raison de leurs caractéristiques physiques et chimiques hétérogènes.
- Le recyclage des déchets a pris une place importante dans le secteur de la construction, notamment dans une perspective de réduction de l'empreinte environnementale. Il constitue une voie prometteuse pour la valorisation des matériaux résiduels et leur intégration dans la fabrication de nouveaux matériaux de construction sur les chantiers

Chapitre III

Béton autoplaçant exposé à la haute température

1. Introduction:

Cette partie présente une analyse des recherches bibliographiques sur l'influence de la température sur les propriétés physiques et mécaniques du béton auto-plaçant. [4]

Les incendies majeurs surviennent ces vingt dernières années ont démontré la difficulté d'appréhender le feu. L'incendie en tunnel est le phénomène le plus redouté, les constructions de tunnels sont complexes et nécessitent des coûts d'investissement parfois très importants. Ces dernières années, le risque lié à l'incendie dans les tunnels a augmenté, du fait du trafic routier, qui s'est densifié, notamment par rapport au nombre de poids lourds transportant des produits inflammables [15]

2. Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées:

2.1 Evolution de la matrice cimentaire:

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différentes transformations physiques et chimiques se produisent. Ces phénomènes concernent la pâte de ciment et les granulats. [5]

Les principales transformations de la matrice cimentaire lors de la montée en température sont :

- 20-120°C : départ de l'eau libre et adsorbée [6], décomposition de l'ettringite à partir de 60 - 70°C [7]. Premiers signes de décomposition de C-S-H avant 100°C.
- 130-170°C:double réaction endothermique lors de la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. [8]
- 450-550°C : décomposition de la portlandite (deshydroxylation par déshydratation). [6]
- 600-750°C : décomposition des C-S-H, formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$. [9]
- Décomposition de carbonate de calcium à partir de 600°C.
- 1200°C : début de fusion du béton. Dans la phase de refroidissement, Alonso et al ont observé une nouvelle formation de la portlandite, ainsi qu'un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de C-S-H. [10]

2.2 Evolution des granulats:

A hautes températures, les granulats se décomposent et subissent des modifications physico-chimiques et minéralogiques significatives qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau.

D'après Nguyen, les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats siliceux par exemple sont considérés neutres. Ils ne réagissent pas avec la pâte de ciment et n'ont pas de liaison importante avec la matrice cimentaire. Les granulats

calcaires au contraire présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment et sont considérés comme réactifs [11].

Les granulats de quartzite (siliceux) présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. À partir de 573°C une transformation du quartz α en quartz β s'accompagne d'une forte dilatation de 1 % à 5 % [12]. Cette variation de structure cristalline dans les granulats peut provoquer une instabilité thermique lors du chauffage. Les travaux de Mindeguia [13] et de Xing [14] ont montré un éclatement du granulat silex entre 110°C et 450°C. Cet endommagement précoce du silex peut être dû à la présence d'eaux piégées dans les micropores ou d'eau provenant de la deshydroxylation des groupes silanols du quartz cryptocristallin.

Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 600°C. Au-delà de cette température, la décarbonatation de la calcite a lieu : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La formation de cette nouvelle Portlandite avec un volume supérieur à celui du granulat initial, crée des nouvelles fissurations dans le béton [5].

3. Evolution des propriétés physiques du béton :

3.1 Dégradation de l'interface pâte-granulats :

Dans le béton, l'interface pâte/granulats est la partie la plus poreuse et la plus fragile. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau adsorbée entourant les granulats, qui favorise le développement des fissures au niveau de cette zone, et à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

La pâte de ciment se dilate jusqu'à la température de 150°C. Cette dilatation est supérieure à celle des granulats, donc les fissures se développent à l'interface pâte/granulats par décohesion (fissures tangentielles). Au-delà de 150°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Cette dilatation différentielle engendre des fissures radiales au sein de la matrice cimentaire. [2]

3.2 Les modifications physico-chimiques dans le béton à haute température:

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées dans le (Tableau I.1).

Tableau III. 1. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température[4]

Entre 30 et 105 °C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C.
Entre 130 et 170 °C:	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C :	On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370 °C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C :	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570 °C:	Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
Entre 600 et 700 °C :	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de β -C ₂ S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.
Entre 700 et 900 °C :	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique
A dessus de 1300-1400 °C :	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

3.3 Evolution de la porosité:

Le béton est un matériau poreux biphasique, composé d'une phase solide et d'une phase poreuse. La porosité totale peut être mesurée par saturation d'eau et la porosité capillaire se mesure généralement par porosimétrie au mercure. [1]

Les travaux menés sur l'évolution de ce paramètre montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. La Figure II.1 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par la méthode la saturation d'eau. [3]

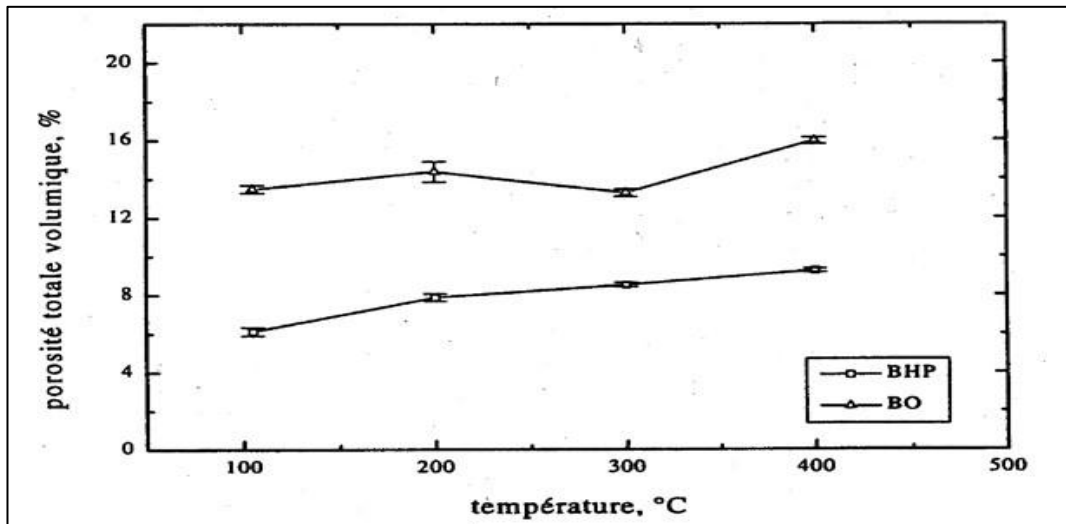


Fig III. 1. Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement . [3]

3.4 Evolution de la masse volumique :

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La Figure II.2 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite. [1]

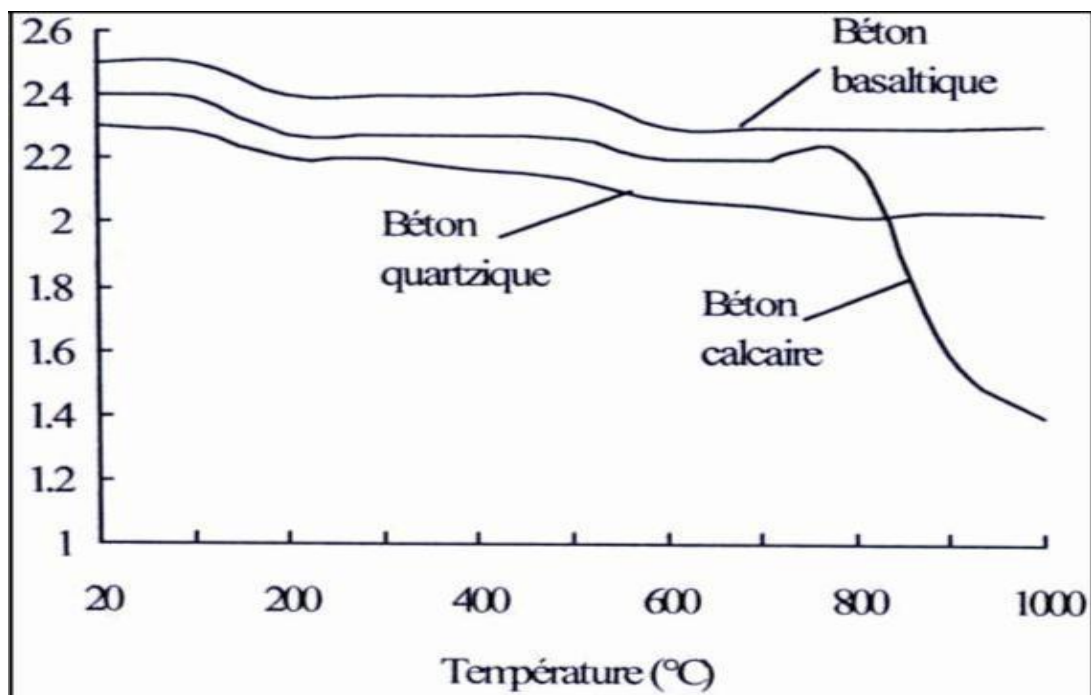


Fig III. 2. Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.[1]

3.5 Perte de masse :

La masse du béton subit une perte de poids au cours du chauffage. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. La perte de masse commence à partir des températures supérieures à 100°C. [2]

3.6 Evolution de la perméabilité:

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Bien que cette perméabilité dépend fortement de la porosité du milieu poreux et d'autres paramètres, tel que la connectivité, la tortuosité ainsi que la constructivité du réseau poreux liée à la taille des pores. La perméabilité du béton dépend également de ses constituants.

Elle est fonction du rapport E/C, qui est directement lié à la porosité capillaire, de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent modifier la tortuosité par la création de l'auréole de transition.

La perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C. [2]

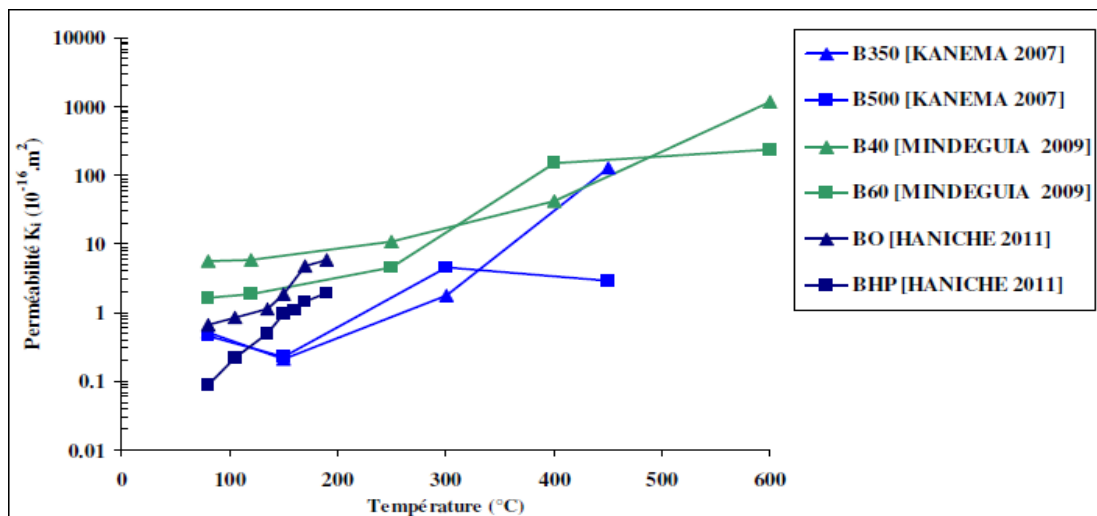


Fig III. 3. Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température [2]

4. Evolution des propriétés mécaniques avec la température:

4.1 Résistance en compression à haute température:

La figure II.4 montre l'évolution des résistances résiduelles en compression de bétons autoplaçants, de bétons ordinaires et à hautes performances. D'une manière générale, les résultats de la littérature montrent que la résistance à la compression du béton (à chaud ou après refroidissement) baisse avec l'élévation de la température.

L'analyse de la courbe d'évolution permet de grouper le comportement de résistance en deux domaines.

– Le premier domaine, de la température ambiante à 300°C - 400°C, est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. La baisse de résistance est observée autour de 100°C – 150°C suivant les auteurs. Cette légère baisse de résistance est liée au départ de l'eau qui, lors de la montée en température, se dilate et entraîne un écartement des feuillets du gel. Cet écartement occasionne ainsi une baisse des forces de cohésion. Jusqu'à la température de 300°C - 400°C, un gain de résistance est remarqué et peut être retardé avec les BHP compte tenu de leur faible perméabilité qui ralentit le départ de l'eau. Le départ de l'eau peut entraîner une augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface.

Le second domaine, au-delà de la température 400°C – 800°C, est caractérisé par une baisse continue de la résistance à la compression liée aux différentes transformations physico-chimiques.[1]

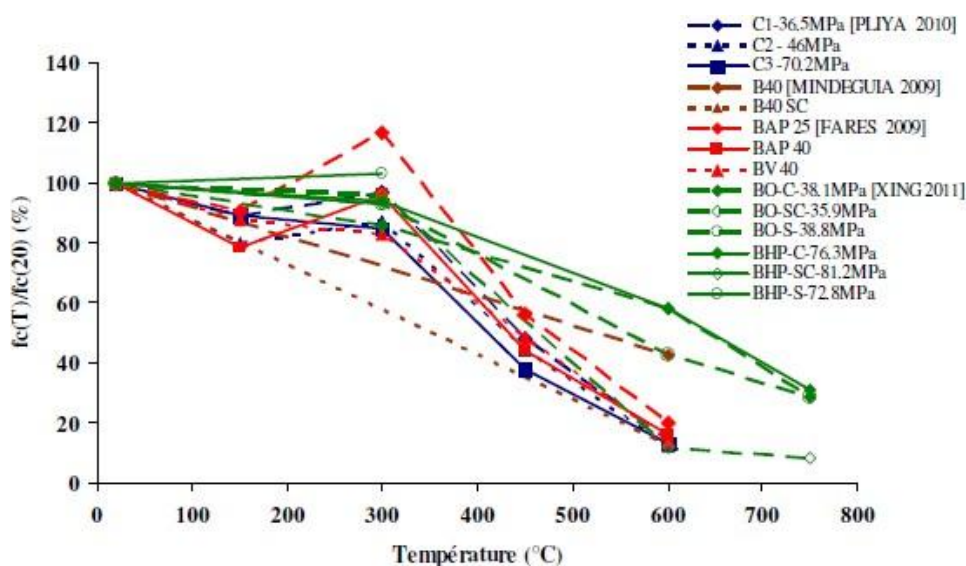


Fig III. 4. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [1]

4.2 Résistance en traction à haute température:

Le béton résiste mieux à la compression qu'à la traction, son comportement en traction est très influencé par la température. La réalisation d'un essai en traction peut se faire selon plusieurs méthodes : flexion 3 ou 4 points, directe (uniaxiale), fendage.

Les essais par fendage sont les plus utilisées en pratique dans ce genre d'étude mais les résultats obtenus sont peu précis et surestiment les valeurs réelles. Les essais de traction sont très difficiles à mettre en œuvre mais donnent des résultats fiables. Ces essais permettent l'évaluation de l'énergie de fissuration à haute température qui est l'un des paramètres fondamentaux (avec le

module élastique et la résistance en traction) requis pour la plupart des modèles de mécanique d'endommagement ou de mécanique de la rupture du béton.

L'essai de flexion 3 points est simple à mettre en œuvre et plus stable du point de vue mécanique. Peu de résultats sont aujourd'hui disponibles à haute température. [3]

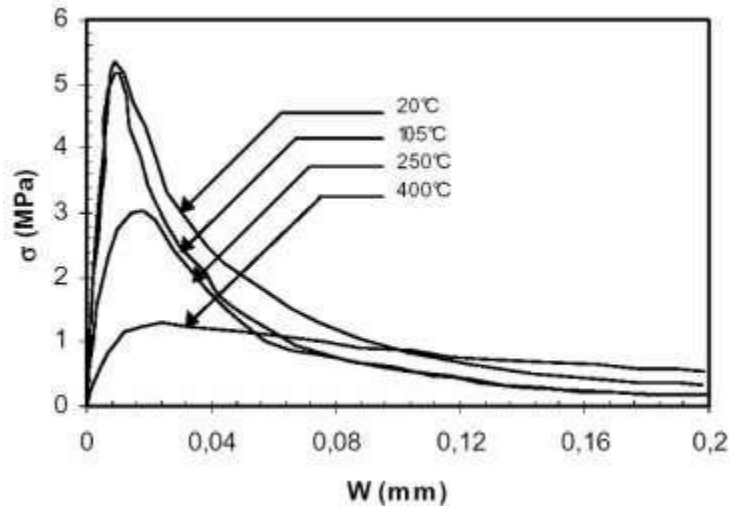


Fig III. 5. Comportement du béton en traction (contrainte-ouverture de fissure) à différentes températures [3].

4.3 Module d'élasticité:

Le comportement des structures dépend souvent du module d'élasticité du béton qui exprime la rigidité du matériau. Il lie la contrainte normale à la déformation instantanée longitudinale lorsque le béton est soumis à des sollicitations uniaxiales. Les différents résultats expérimentaux montrent que le module d'élasticité du béton est fortement affecté par la température. Les variations du module d'élasticité avec la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment d'une part et des paramètres expérimentaux d'autre part (la vitesse de chauffage, la teneur en eau, la nature des granulats ...) [2]

La Figure II.6 montre les évolutions des modules élastiques à chaud et après refroidissement. Dans la série I, les éprouvettes sont chauffées sans chargement à 1°C/min à la température désirée puis maintenue à cette température avant d'être chargées. Dans la série II, les éprouvettes sont chauffées jusqu'à la température désirée, puis elles sont refroidies avec une vitesse de 0,5°C/min avant d'être chargées. Ces essais montrent que la rigidité du matériau baisse généralement en fonction de la température jusqu'à 120°C. Entre 200°C et 300 °C, les résultats de la Figure II.6 montrent que le module est à peu près constant. [1]

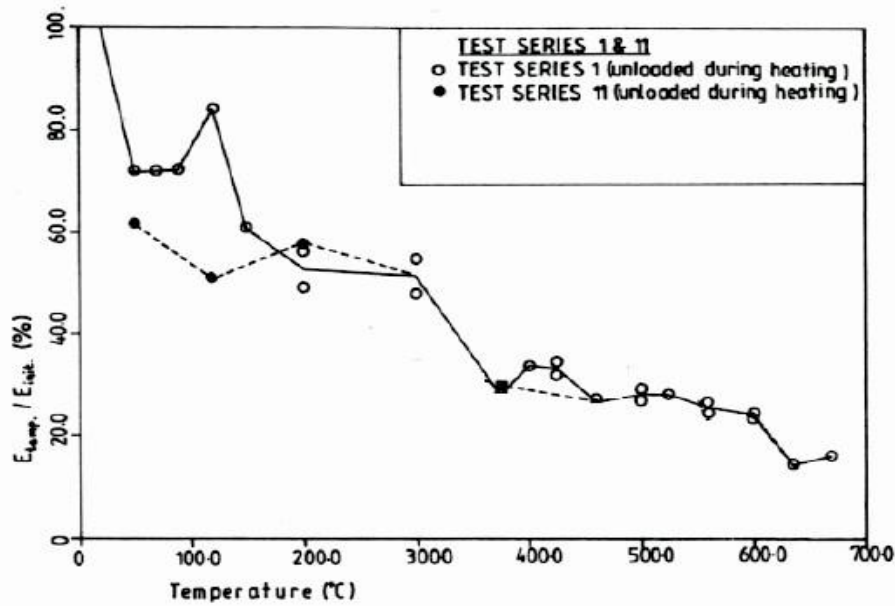


Fig III. 6. Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température [1]

5. Conclusion:

Les études montrent que les bétons autoplaçants à hautes performances (BAP) présentent une conductivité thermique comparable à celle des bétons haute performance (BHP). Lorsque la température augmente, les propriétés de transfert, telles que la porosité et la perte de masse, se détériorent de manière significative.

Concernant la résistance à la compression, aucune différence notable n'a été observée entre les BAP et les bétons ordinaires (BO). Toutefois, certaines recherches indiquent qu'au-delà de 700°C, la résistance des BAP diminue fortement. Cette faiblesse est principalement due à l'utilisation de fillers calcaires, qui subissent une décarbonatation à partir de 750°C.

Par ailleurs, les BAP présentent un comportement thermique plus instable que les BO, notamment une plus grande propension à l'éclatement sous l'effet de la chaleur. Ce risque peut être réduit si le taux d'humidité est faible. Cependant, cet état est difficile à atteindre en raison de la faible perméabilité des BAP, ce qui ralentit considérablement leur séchage.

Chapitre IV

Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du béton

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant et leurs caractéristiques, à savoir : les granulats, le ciment, les additions minérales, les adjuvants et l'eau.

2. Caractéristiques des matériaux utilisés et composition du BAP:

Les essais sur les matériaux utilisés pour la confection du béton ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de M'Sila. Les matériaux utilisés sont :

- Le sable d'origine siliceux provenant DE DJAMAA WILAYA d'OUED SOUF
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) l'origine calcaire à MAAZA M'sila.
- Ciment CPA 42.5R et provenant de la cimenterie Djar Belahrache Biskra
- Déchets de verre (transparent)
- L'adjuvant : NOVSUPERLOW super plastifiant haut réducteur d'eau provenant de la SARL CHEMICAL INNOVATION- Ouled Bellil- w Bouira (FICHE TECHNIQUE)
- L'ajout : le filler (farine de marbre de fraction 0,08mm)
- L'eau de gâchage et de conservation : eau potable du laboratoire.

2.1 Le sable

2.1.1 Analyse granulométrique: [NF EN 933-1]

L'analyse granulométrique par tamisage se définit comme un ensemble d'opérations visant à séparer les composants d'un échantillon selon leur taille, en utilisant des tamis à mailles carrées. Cette méthode permet d'obtenir une représentation précise de la distribution en masse sèche des particules en fonction de leurs dimensions, ce qui contribue à l'analyse des caractéristiques et du classement du granulât.

Mode opératoire :

- Prélever une masse de 2 Kg de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide, soit mi la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,16-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 5 minutes.
- Peser chacun des tamis.
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.

- A la fin tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis a 1g près, soit M_i : la masse de tamis(i) + le sable.
- Calculer la différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R_1 de tamis 1).
- Reprendre ma même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis a R_1 , soit R_2 la masse de refus m de tamis 2(R_2
- $=R_1$ + refus partiel sur tamis 2).
- Pour suivre la même opération avec la rente des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumules R_3, R_4, \dots, R_n le tamisât est calculé par la relation :



Fig IV. 1 Matériels utilisé pour l'analyse granulométrique

Tableau IV. 1 Analyse granulométrique du sable

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	19	19	0.95	99.05
1.25	98	117	5.85	94.15
0.63	1220	1337	66.85	33.15
0.315	468	1805	90.25	9.75
0.16	166	1971	98.55	1.45
0.08	27	1998	99.9	0.14
fond	2	2000	100	0

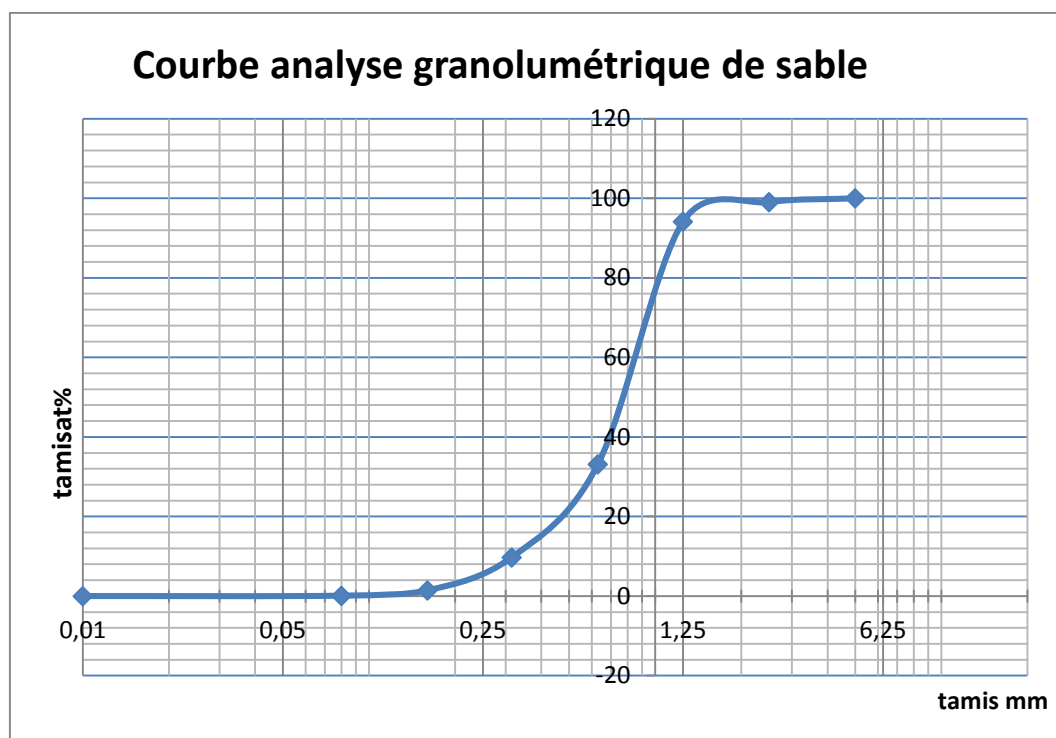


Fig IV. 2 Courbe granulométrique du sable

2.1.2 Caractéristiques physiques du sable :

2.1.2.1 La masse volumique absolue: [NF EN 1097-7]

C'est la masse de la matière par unité de volume de matière solide pure (volume de la matière seule, pores à l'intérieur des grains), après passage au l'étuve à 105°C, notée et exprimée en unités telles que (g/cm³, kg/m³, T/m³).

Mode opératoire :

- Peser des échantillons secs : M1 = 300 g de granulats Remplir l'éprouvette échantillon gradué avec un volume d'eau V1=300 ml
- Introduire les granulats dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air
- Lire le nouveau volume V2
- Calculer la masse volumique absolue $\rho_{abs} = M/V2 - V1$
- Refaire la mesure 3 fois

Tableau IV. 2 la masse volumique absolue du sable :

Designation	M(g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	300	300	425	2.40	2.53 (g/cm ³)
Essai 2	300	300	415	2.60	
Essai 3	300	300	415	2.60	

2.1.2.2 La masse volumique apparente: [NF EN 1097-6]

a) La masse volumique à l'état lâche :

- On détermine la masse volumique apparente du sable d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5l
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec
- On pèse le récipient de capacité de 1 L, soit M_1 ce poids
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M_2 ce poids
- La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

d'où :

V_r = volume de récipient

Tableau IV. 3 La masse volumique apparente à l'état lâche VR=1000 ml

designation	$M_1(g)$	$M_2(g)$	$\rho_{app} (g/cm^3)$	Moyenne
Essai 1	218	1831.11	1.61	1.61 (g/cm³)
Essai 2	218	1828.7	1.61	
Essai 3	218	1836.6	1.62	

2.1.2.3 Equivalent de sable : [NF EN 933-8]

L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propreté d'un sable .il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieur à 500g)
- Prendre une pesée de 120g
- Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai dans l'éprouvette et fortement a plusieurs avec la pauma de la main de chasser les bulles d'air
- Laisser reposer pendant 10minutes
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20cm de cours horizontales en 30 secondes à la main a l'aïd d'un agitateur mécanique

- Retire le bouchon, le rincer avec la solution lavant au –dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de cette dernière
- Faire seconder le tube lavant dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage, cette opération pour but de laver de sable et de faire montrer les éléments fins et argileux.
- Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavante atteigne le 2 repère, laisser ensuite reposer pendant 20 minutes

a. Equivalant de sable visuel (E.S.V) :

- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer régalement avec le réglet la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On a :

$$E.S.V = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100(\%)$$

h_1 : la hauteur du

sable +floculat, h_2 :

la hauteur de sable

($h_2 < h_1$)

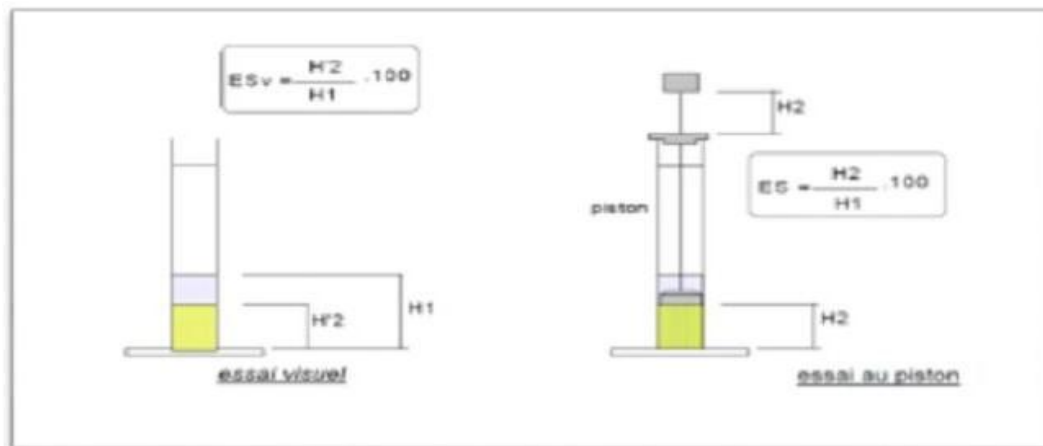


Fig IV. 3. Essai d'équivalent de sable[]

b. Equivalent de sable piston (E.S.P):

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci l'éprouvette.
- Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que zéro vienne buter

contre la face intérieure de la tête du piston, soit h'_2 la hauteur lue et correspondant et la hauteur la partie sédimentée.

$$E.S.P = (h'_2/h_1) / 100(\%)$$

ON a :

h_1 : la hauteur du

sable +floculat, h'_2 :

la hauteur du sable

($h'_2 < h_1$)

Tableau IV. 4. Equivalent de sable

Designation	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E.S.V(%)	h'_2 (cm)	E.S.P(%)
Essai 1	11	9	81.81	8.7	79.09
Essai 2	10.9	8.9	81.65	8.6	78.89
Essai 3	11.4	8.8	77.19	8.7	76.31

$$(E.S.V)_{moy} = 80.21$$

$$(E.S.P)_{moy} = 78.09$$

C'est un sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses et convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

Tableau IV. 5 La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).[3]

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

2.2. Le gravier :

2.2.1 Analyse granulométrique :

Les fractions de gravier utilisé sont le 3/8 et le 8/16

Tableau IV. 6 Analyse granulométrique du gravier 8/16

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
20	7	7	0.46	99.54
16	53	60	4	96
12.5	411	471	31.4	68.6
10	623	1094	72.93	27.07
8	345	1439	95.93	4.07
6.3	56	1495	99.6	0.4
fond	2	1500	100	0

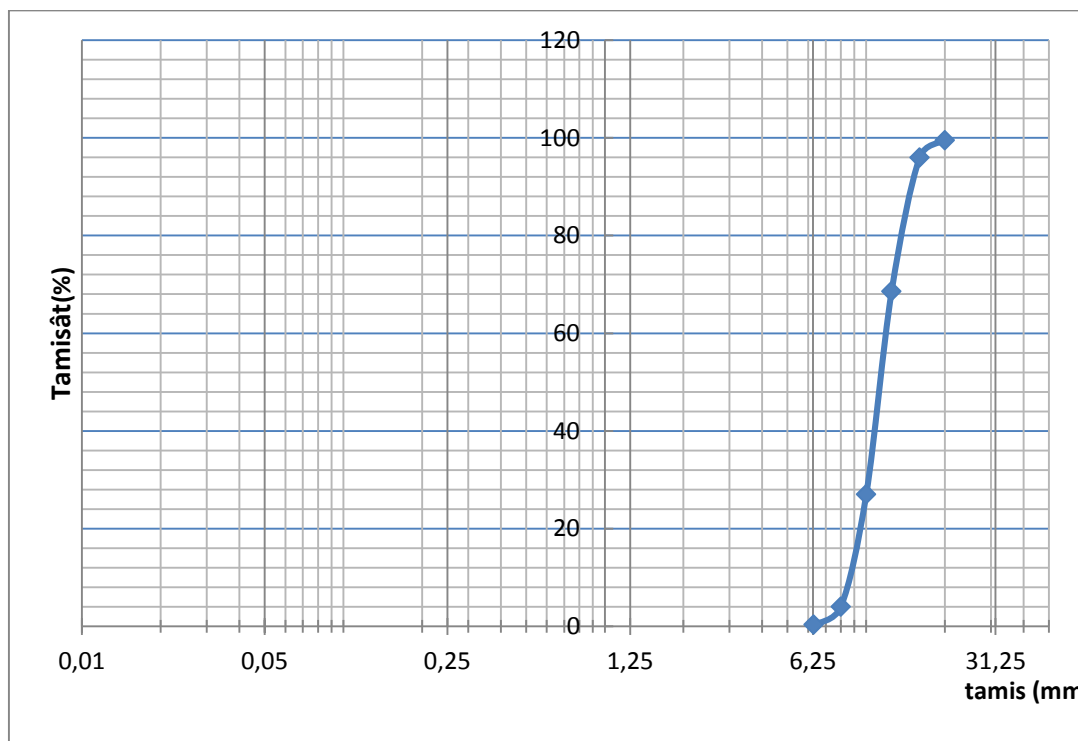


Fig IV. 4 Courbe granulométrique de Gravier (8/16)

Tableau IV. 7 Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
10	4	4	0.26	99.74
8	142	146	9.73	90.27
6.3	1050	1196	79.73	20.27
5	137	1333	88.86	11.14
4	91	1424	94.93	5.07
3.15	42	1466	97.73	2.27
2.5	5	1471	98.06	1.94
fond	27	1498	99.8	0.2

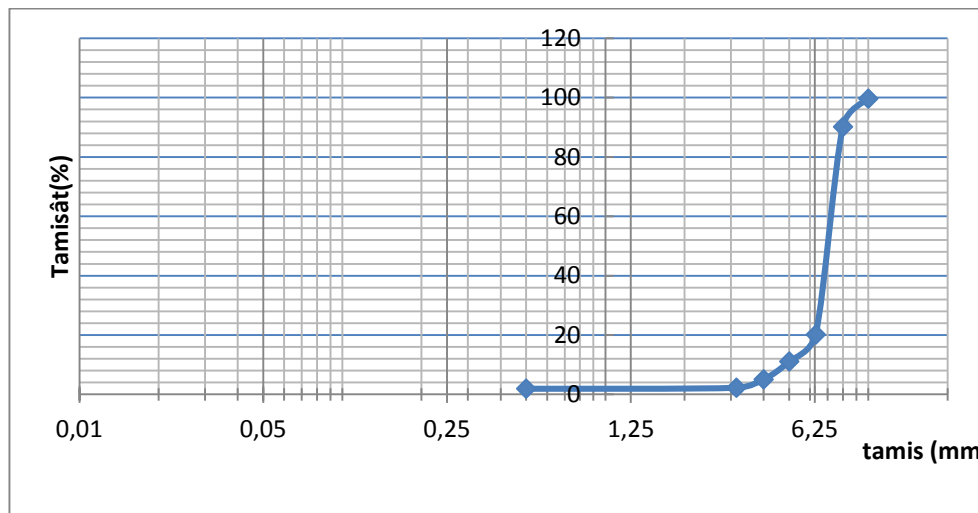


Fig IV. 5 Courbe granulométrique de Gravier (3/8)

2.2.2 Caractéristiques physiques du gravier :

2.2.2.1 La masse volumique apparente : [NF P 18-554]

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

Mode opératoire :

- Verser les granulats dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par les couches horizontales successives.
- Araser la couche supérieure des granulats à l'aide d'une règlette. La masse volumique est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$$

D'où :

Vr : volume du récipient

M2 : poids de l'ensemble (granulat +

récipient) M1 : poids du l'ensemble

Tableau IV. 8 la masse volumique apparente du gravier

Désignation	Gravier	V(cm ³)	M1(g)	M2(g)	P _{app} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	3/8	1000	115	1312.2	1.30	1.30
Essai 2			115	1319	1.30	
Essai 3			115	1323	1.30	
Essai 1	8/16	1000	115	1297	1.30	1.26
Essai 2			115	1307	1.30	
Essai 3			115	1251	1.20	

2.2.2.2 La masse volumique absolue du gravier :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieure des grains exclus), après passage à l'étuve à 105°C, notée et exprimée en (g/cm³,kg/m³,T/m³)

Mode opératoire :

- Peser des échantillons secs : M1 = 200g / M2 = 200g / M3 = 200g de granulats
- Remplir l'éprouvette échantillon gradué avec un volume d'eau V1= 200 ml
- Introduire les granulats dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air
- Lire le nouveau volume V2
- Calculer la masse volumique absolue $\rho_{abs} = M/V2 - V1$
- Refaire la mesure 3 fois

Tableau IV. 9 la masse volumique absolue du gravier :

Désignation	Gravier	M(g)	V1(cm ³)	V2(cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	3/8	300	300	410	2.72	2.76 (g/cm³)
Essai 2			300	410	2.72	
Essai 3			300	405	2.85	
Essai 1	8/16	300	300	410	2.72	2.68 (g/cm³)
Essai 2			300	415	2.6	
Essai 3			300	410	2.72	

2.3 Le ciment :

Le ciment utilisé dans ce travail est le ciment Portland (CPA) de ciment Biskria (CEM I 42.5R), pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid (FICHE TECHNIQUE)



Fig IV. 6 ciment (ciment Biskria)

Tableau IV. 10 caractéristique technique

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₃ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5

2.4. Les adjuvants :

Sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à dosage inférieur à 5% en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du durci, (**norme 934-2**).

L'adjuvant utilisé est de la NOVA SUPERFLOW qui est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Fiche technique [1].

2.5 Déchets de verre :

Les déchets de verre désignent les produits en verre qui sont considérés comme inutilisables ou indésirables dans leur forme actuelle et qui sont destinés à être éliminés ou recyclés. Ces déchets peuvent provenir de diverses sources telles que les emballages en verre, les bouteilles etc. le diamètre de celui-ci être presque 5 mm et de couleur transparent.

2.5.1 Analyse granulométrique du verre :

L'analyse granulométrique par tamisage se définit comme un ensemble d'opérations visant à séparer les composants d'un échantillon selon leur taille, en utilisant des tamis à mailles carrées. Cette méthode permet d'obtenir une représentation précise de la distribution en masse sèche des particules en fonction de leurs dimensions, ce qui contribue à l'analyse des caractéristiques et du classement du granulât.

Mode opératoire :

- Prélever une masse de 1.5 Kg de matériau (verre).
- Peser chaque tamis à vide, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0.16-0,08-fond].
- Verser le verre sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 5 minutes.
- Peser chacun des tamis.
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.
- Au fin tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis à 1g près, soit M_i : la masse de tamis(i) + le sable.
- Calculer la différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R_1 de tamis 1).
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à R_1 , soit R_2 la masse de refus m de tamis 2 ($R_2 = R_1 + \text{refus partiel sur tamis 2}$).

Tableau IV. 11 Analyse granulométrique du verre

Tamis	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
		(g)	(%)	
5	83	83	5.53	94.47
2.5	906	989	65.93	34.07
1.25	178	1167	77.8	22.2
0.63	154	1321	88.06	11.94
0.315	80	1401	93.4	6.6
0.16	55	1456	97.06	2.94
0.08	28	1484	98.93	1.07
fond	13	1497	99.8	0

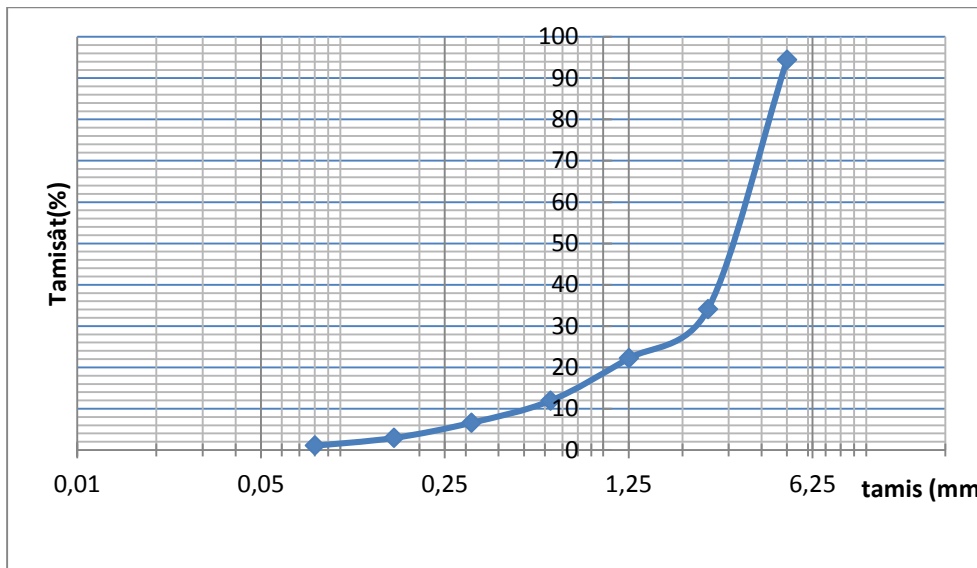


Fig IV. 7 Courbe granulométrique du verre

2.5.2 Caractéristiques physiques du verre :

2.5.2.1 La masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105°C, notée et exprimée en ($\text{g/cm}^3, \text{kg/m}^3, \text{T/m}^3$)

Mode opératoire :

- Peser des échantillons secs : M1 = 200g / M2 = 200g / M3 = 200g du verre
- Remplir l'éprouvette échantillon gradué avec un volume d'eau V1=155 ml
- Introduire les granulats dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air
- Lire le nouveau volume V2

- Calculer la masse volumique absolue $\rho_{abs}=M/V_2-V_1$
- Refaire la mesure 3 fois

Tableau IV. 12 la masse volumique absolue du verre :

Désignation	M(g)	V1(cm ³)	V2(cm ³)	$\rho_{abs}(g/cm^3)$	Moyenne
Essai 1	200	200	238	2.40	2.37 g/cm³
Essai 2	200	200	238	2.40	
Essai 3	200	200	241	2.32	

2.5.2.2 La masse volumique apparente :

a) La masse volumique à l'état lâche :

- On détermine la masse volumique apparente du verre d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5 l
- On remplit l'entonnoir avec du verre
- On pèse le récipient de capacité de 1 L, soit M1 ce poids
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du verre
- On nivelle la surface du verre et on pèse le tout, soit M2 ce poids

La masse volumique apparente du verre est donnée par la formule suivante

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

d'où :

V_r = volume de récipient

Tableau IV. 13 La masse volumique apparente du verre à l'état lâche VR=1000ml

désignation	M1(g)	M2(g)	$\rho_{app} (g/cm^3)$	Moyenne (g/cm ³)
Essai 1	218	1471	1.25	1.26
Essai 2	218	1488	1.27	
Essai 3	218	1486	1.26	

2.6 Le filler (marbre) :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite.

Tableau IV. 14 Caractéristiques physiques du marbre

Propriétés Physique	Fine Marbre
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.83
Densité	2.67
Surface spécifique de Blaine (cm ³ /g)	448

Tableau IV. 15 Caractéristiques chimiques du marbre

Analyses chimique	Fines marbre
SiO ₂	1.47
CaO	55.3
MgO	0.01
Fe ₂ O ₃	0.14
Al ₂ O ₃	0.35
Na ₂ O ₃	0.12
K ₂ O	0.04
SO ₃	0.01
Perte au feu	42.65

2.7. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de génie civil.

Tableau IV. 16 Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage

La mesure	Teneur en eau (mg/l)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl ⁻	234.3
Sulfate SO ⁴	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Eligibilité d'oxydation en eau	1024

3. Formulation du béton auto plaçant :

3.1. Préparation de la gâchée :

La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie. [2]

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatique et cubique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage. [2]
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marbre) et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- Ajouter les trois quart d'eau graduellement. [2]
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Pour un BAP avec Déchets de verre substitution d'une partie du sable par déchets de verre. Les pourcentages de substitution varient de 10%, 20% et 30%.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration. [2]

3.2. Conservation des éprouvettes

Après le gâchage pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont Conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h d'hydratation du ciment. [2]

3.3. Formulation de béton auto plaçant :

Pour la formulation du béton auto plaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique.

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée. [2]

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m^3 de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- ◆ Un rapport $G/S = 1$.
- ◆ Un rapport $E/C = 0.5$.
- ◆ Un dosage en ciment plutôt élevé $C = 420 \text{ kg/m}^3$
- ◆ Un pourcentage déterminé en ajouts (super plastifiant, les fillers, ou encore les deux). Le filler $F = 10\% * C$, et le super plastifiant $SP40 = 1.7\% * C$ [2]

3.3.1 Les constituants présents dans le mélange :

$$G + S + C + E + F + SP = 1000 \text{ litres}$$

Avec:

$$E/C = 0.5 \Rightarrow E = 420 * 0.5 = 210 \text{ kg/m}^3$$

La masse volumique de l'eau est 1000 kg/m^3 ce qui implique que

$$E = 210 \text{ l/m}^3$$

Si on prend un dosage en F de 10% C on a

$$F = 10\% * C = 420 \text{ kg/m}^3 * 10\% = 42 \text{ kg/m}^3$$

Le filler utilisé est le marbre, et sa densité absolue égale à 2.67 Ce qui nous donne en termes de volume : $42 / 2.67 = 15.73 \text{ l/m}^3$

$$\text{Le dosage du super plastifiant est : } 1.5\% * C = 1.5\% * 420 \text{ kg/m}^3 = 6.3 \text{ kg/m}^3$$

La densité absolue du super plastifiant SP40 est égale à 1.05

$$\text{Ce qui nous donne en termes de volume : } 6.3 / 1.05 = 6 \text{ l/m}^3$$

La densité absolue du ciment est égale à 3.1

$$\text{Le volume du ciment est : } 420 / 3.1 = 135.48 \text{ l/m}^3$$

On peut calculer les proportions des graviers et du sable :

Le volume de la pâte pour 1m^3 de béton est :

$$C + E + F + SP = 135,48 + 210 + 15,73 + 6 = 367.21 \text{ litres}$$

Le volume des granulats pour 1m^3 de béton est :

$$G + S = 1000 - 367.21 = 632.79 \text{ litres}$$

Avec $G/S = 1$

$$\text{On a donc: } G = S = 316.395 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de G8/16 et 50% du G 3/8

Gravier (3/8) : $50\% = 158.19 \text{ l/m}^3$

Gravier (8/16) : $50\% = 158.19 \text{ l/m}^3$ et pour le Sable : $S = 316.4 \text{ l/m}^3$ En terme de poids on a :

Gravier (3/8) = $158.19 * 2.76 = 436.60 \text{ kg/m}^3$

Gravier (8/16) = $158.19 * 2.68 = 423.94 \text{ kg/m}^3$

Sable = $316.4 * 2.53 = 800.49 \text{ kg/m}^3$

3.3.2 Les déchets de verre :

Des bouteilles en verre ou bien déchets industriels.

La densité : 2.37 g/cm^3

Substitution du sable en volume.

Les pourcentages : 0% ; 10% ; 20% et 30% de volume de sable

Tableau IV. 17 La composition des matériaux pour 1m³ de béton

Composant	Composant en volume (l/m ³)	Composant en masse volumique (kg/m ³)
Gravier 3/8	158.19	436.60
Gravie 8/16	158.19	423.94
Sable	316.4	800.49
Ciment	135.48	420
Eau	210	210
Super plastifiant	6	6.3
Filler (marbre)	15.73	42

3.3.3 Les compositions des différents bétons :

BAP1 : Béton Auto plaçant avec 0% de Déchets de Verre.

BAP2 : Béton Auto plaçant avec 10% de Déchets de Verre.

BAP3 : béton Auto plaçant avec 20% de Déchets de Verre.

BAP4 : béton Auto plaçant avec 30% de Déchets de Verre.

4. Conclusion :

Les essais physiques, ainsi que les analyses chimiques et minéralogiques réalisés dans différents laboratoires, offrent une vue d'ensemble des principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation des bétons. Ces bétons seront étudiés dans le chapitre suivant du point de vue rhéologique et mécanique.

La connaissance de ces caractéristiques contribue de manière significative à l'interprétation et à la discussion des résultats expérimentaux.

Chapitre V
Techniques expérimentales
des BAP

1. INTRODUCTION :

Ce chapitre résume les essais effectués sur le béton auto-plaçant dans le cadre de cette étude, réalisée au niveau du laboratoire de génie civil de l'Université de M'Sila. L'objectif de ces essais est de déterminer les propriétés du béton auto-plaçant à l'état frais et à l'état durci.

2. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état frais :

Ces dernières années, de nombreuses études ont été consacrées au béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci. On peut mentionner parmi les tests fréquemment employés pour caractériser les bétons autoplaçants à l'état frais on pourra citer :

- La détermination de la consistance au cône d'Abrams ;
- La détermination du risque de blocage à l'aide de la boîte L ;
- La détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis

2.1 Détermination de la consistance au cône d'Abrams : NF EN 12 350-8

L'essai d'étalement est considéré comme le plus facile à réaliser, et il permet d'évaluer la consistance du béton. Cet essai est effectué comme l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Cette expérience permet aussi de déterminer si une séparation horizontale a lieu. Cet essai, réalisable sur place, n'exige que de modestes échantillons de béton. La valeur de 60 à 75 cm est généralement visée pour obtenir le BAP.

2.1.1 Matériel utilisé :

- Une plaque carré 120 centimètres de côté ;
- Un cône d'Abrams ;
- Une règle de centimètres.

2.1.2 Mode opératoire :

- Placer la plaque sur un support stable et horizontal (Fig. IV.1).
- On mouille la surface de la planche pour éviter que le béton n'y colle, et on essuie l'excès d'eau avec un chiffon.
- Placer le cône d'Abrams au centre de la planche, en coulant le béton de manière continue, jusqu'au sommet du cône.
- Araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer le panneau si nécessaire avec un chiffon humide.
- On soulève le cône verticalement avec des contacteurs.
- Une fois le béton étalé sur la table, nous mesurons le diamètre final sur des côtés spécifiques et notez les deux valeurs.

- Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, le test doit être invalidé et renouvelé ;
- Le résultat final est l'évaluateur moyen obtenu. **Soit** : $\text{pendage débit} = (D1 + D2) / 2$.



Fig V. 1 Essai d'étalement

2.2 Détermination du risque de blocage à l'aide de la boîte L : NF EN 12 350-10

Cet essai est réalisé en utilisant une boîte en L. Des essais pratiques sont permis dans un espace sécurisé et assurez-vous que la production de béton ne sera pas entravée par des incidents de blocage inadmissibles comme l'apparition de renforts, par exemple.



Fig V. 2 Essai de la boîte L

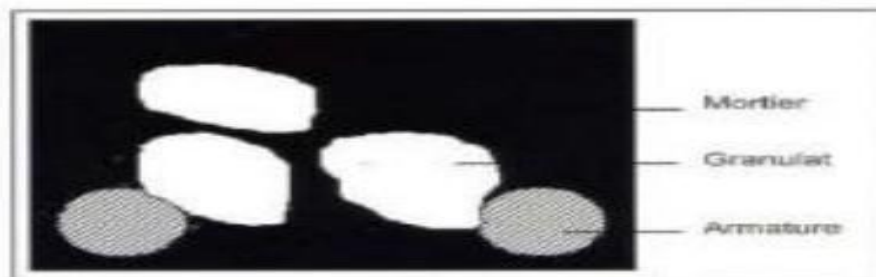


Fig V. 3 Blocage des granulats par la présence d'armatures [1]

2.2.1 Objet de boîte en L :

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

Un rapport (H2/H1) d'au moins 0.8 pour un béton autoplaçant.

2.2.2 Mode opératoire :

- Remplir la partie verticale de la boîte en L ;
- Attendre une minute avant de soulever la trappe, le béton s'écoule à travers la grille ;
- Calculer le rapport de la hauteur de béton dans la partie verticale de la boîte après l'essai et la hauteur du béton dans l'extrémité de la partie horizontale.

2.3 Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis : NF EN 12 350-11

2.3.1 Matériel utilisé :

- Un seau de 10 litres équipé d'un couvercle ;
- Un tamis de 5 mm, ainsi qu'un fond ;
- Une bascule de précision (pesée minimale de 20 grammes).

2.3.2 Mode opératoire :

C'est un essai de qualification des bétons auto-plaçant face au risque de ségrégation.

- Après le malaxage du béton, verser le béton dans le seau. Le temps d'attente entre l'arrêt de malaxage et le prélèvement doit être inférieur à 30 secondes . Il consiste à déposer un poids de béton égal à 5 kg sur un tamis ayant des mailles de 5mm d'ouverture.
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation, et attendre 5 minutes plus tard, nous sommes une quantité pondérée qui a traversé le Tamis

$$II = \left(\frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{échabillon}}} \right) \cdot 100$$



Fig V. 4 Essai de la stabilité au tamis

En fonction du résultat trouvé, on classe les bétons comme suit :

Tableau V. 1 Classement de la formulation selon le pourcentage

% de laitance Π	Classement de la formulation
$0 \leq \Pi \leq 15$	Stabilité satisfaisante
$15 < \Pi \leq 30$	Stabilité critique
$\Pi > 30$	Stabilité très mauvaise (béton inutilisable)

2.4 La masse volumique du béton autoplaçant [NF EN 12 350-6]:

Voir été essayées ou nettoyées, les éprouvettes sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000. La masse volumique est alors calculée en divisant sa le volume de l'éprouvette. C'est-à-dire : $\rho = M/V$. La masse volumique exprimée en kg/dm³ car-la densité.

3. Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état durci :

3.1 Essai de compression : NF EN 12390-3

a. But de l'essai :

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.

L'essai se fait sur une éprouvette cubique de dimensions normalisées 10x10x10 cm³

b. Principe de l'essai :

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cubique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches sans vibration.
- Le démoulage se fera après une 48 heure.

- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20C°.
- La résistance sera déterminée à 28 jours.



Fig V. 5 L'appareil de l'essai de compression

c. Conduite de l'essai :

Une fois le délai écoulé, l'éprouvette est retirée du bac d'eau et laissée à sécher pendant 24 heures. Ensuite, elle est placée entre les mâchoires de la machine d'essai, et une seule lecture est enregistrée, représentant la force ayant provoqué la rupture de l'échantillon. Cette lecture est notée F.

- Calculs : La résistance sera: $G = F/S$ Avec :
- S : section de l'éprouvette : 100 cm²
- F : force au moment de la rupture

3.2 Essai de flexion : NF EN 12390-5

a. But de l'essai :

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton.

C'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prisme de dimensions (7x7x28) cm³ de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.



Fig V. 6 L'appareil de l'essai de traction par flexion

b. Conduite de l'essai :

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

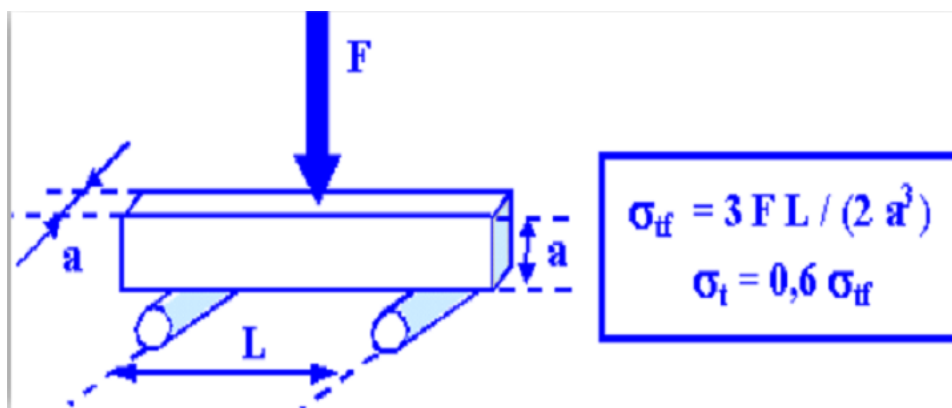


Fig V. 7 Formule de calcul de la résistance de flexion

4. Conclusion :

Le chapitre quatre se concentre sur l'investigation expérimentale, où nous détaillons les matériels et outils utilisés dans notre recherche ainsi que les tests effectués en laboratoire. Ce chapitre aborde les expériences scientifiques menées en laboratoire ainsi que l'équipement employé lors de ces travaux. Nous avons également analysé dans cette section les deux phases du béton autoplaçant, l'état frais et l'état durci, et conduit nos expérimentations en nous basant sur ces deux états.



Chapitre VI
Résultats et Discussions

1. Introduction :

Cette étude vise à examiner l'impact du remplacement du sable par du verre recyclé broyé dans le béton auto-plaçant, en comparant les propriétés de ce type de béton avec celles du béton auto-plaçant sans verre. L'objectif est de vérifier si ce nouveau mélange maintient le même niveau de qualité ou offre une performance supérieure par rapport au béton sans verre.

2. Résultats des essais à l'état frais :

Dans cette partie du travail, les méthodes recommandées par l'AFGC ont été appliquées pour réaliser une série d'essais sur les mélanges préparés, dans le but d'analyser les propriétés du béton à l'état frais.

Tableau VI. 1 Résultats des essais à l'état frais

type du béton	L'étalement(cm)	Stabilité au tamis(%)	La boîte en L (H2/H1) (cm)	la masse volumique(kg/m ³)
BAP1	73	14.34	0.89	2406
BAP2	72	4.88	0.87	2320
BAP3	75	12.4	0.96	2348
BAP4	75	2.54	0.91	2345

1.1 Essai d'étalement au cône d'Abram's :

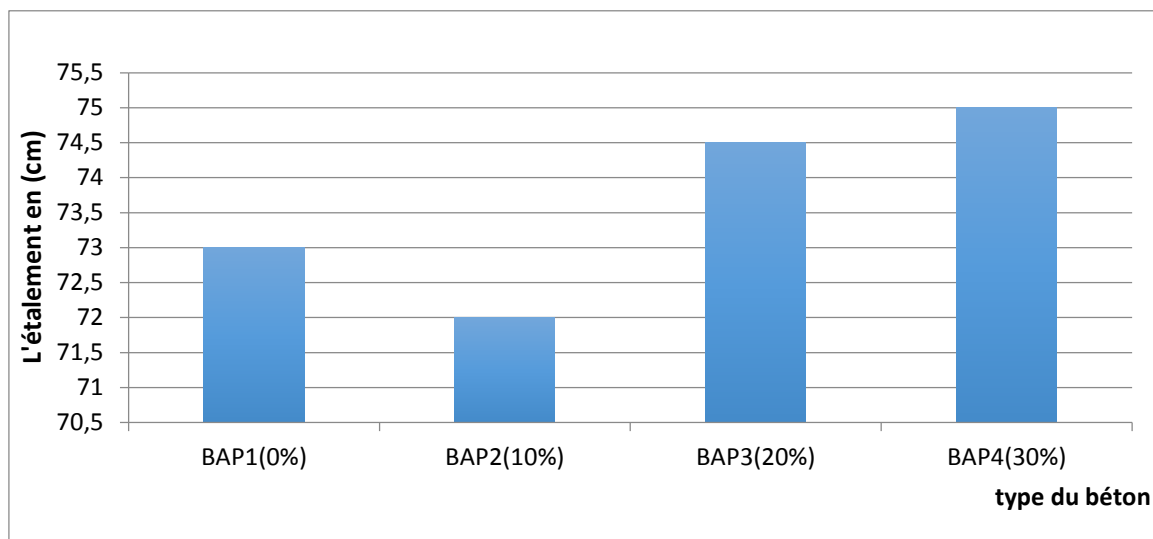


Fig VI. 1 L'étalement en fonction de type de béton

Remarque :

La figure V.1 présente les valeurs d'étalement selon le type de béton. On remarque que la formulation BAP1 (0%) a enregistré un étalement de 73 cm. La formulation BAP2 (10 %) montre une légère diminution, avec une valeur d'étalement de 72 cm.

En revanche, la formulation BAP3 (20 %) présente une augmentation notable, atteignant sa valeur maximale avec la formulation BAP4 (30 %), soit 75 cm.

Ces résultats indiquent que l'augmentation du taux de substitution améliore les propriétés du béton à l'état frais, tout en permettant le recyclage des déchets de verre comme matériau de remplacement écologique.

1.2 Essai de stabilité au tamis :

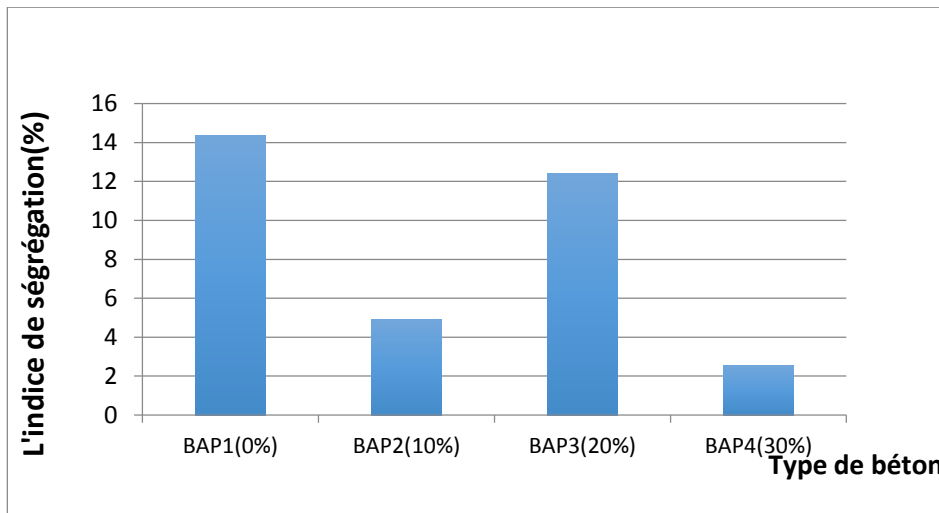


Fig VI. 2 L'indice de ségrégation en fonction de types de béton

Remarque :

À partir des résultats obtenus de l'essai de l'indice de ségrégation, on peut dire que les bétons autoplaçants présentent une bonne stabilité, les valeurs se situant dans la plage autorisée ($0 \leq \Pi \leq 15$), ce qui indique que la composition testée répond aux critères de stabilité requis. Et que le remplacement du sable par du verre n'a pas d'influence significative sur l'indice de ségrégation.

1.3 Essai de la boîte en L :

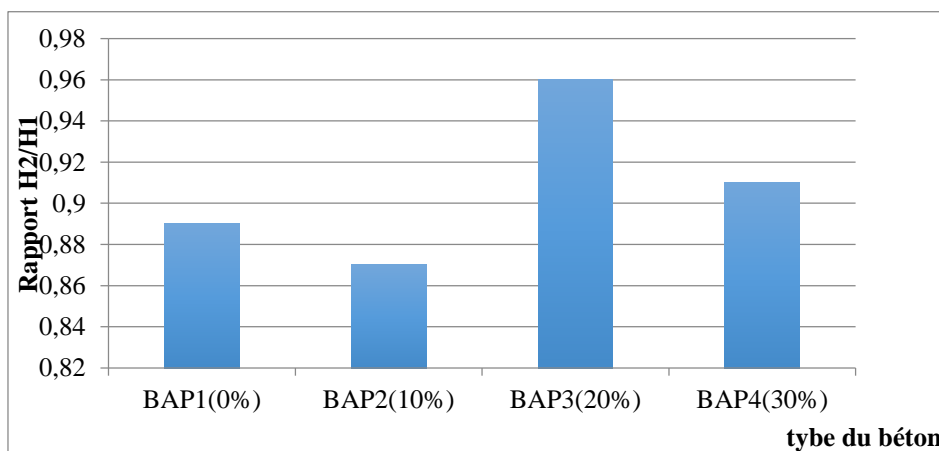


Fig VI. 3 Le taux de remplissage en fonction de type de béton

Remarque :

L'essai est exploité au travers du taux de remplissage (rapport H2/H1) qui doit en principe être supérieur à 0.8. On note que tous les BAP respectent cette condition. Le BAP3 (20%) présente le taux de remplissage le plus élevé, ce qui traduit une meilleure fluidité et remplissage du béton. Les autres BAP, bien qu'ils montrent des taux légèrement inférieurs, restent conformes aux exigences de remplissage sans blocages notables du béton, même avec des pourcentages variés de déchets de verre.

1.4 La masse volumique :

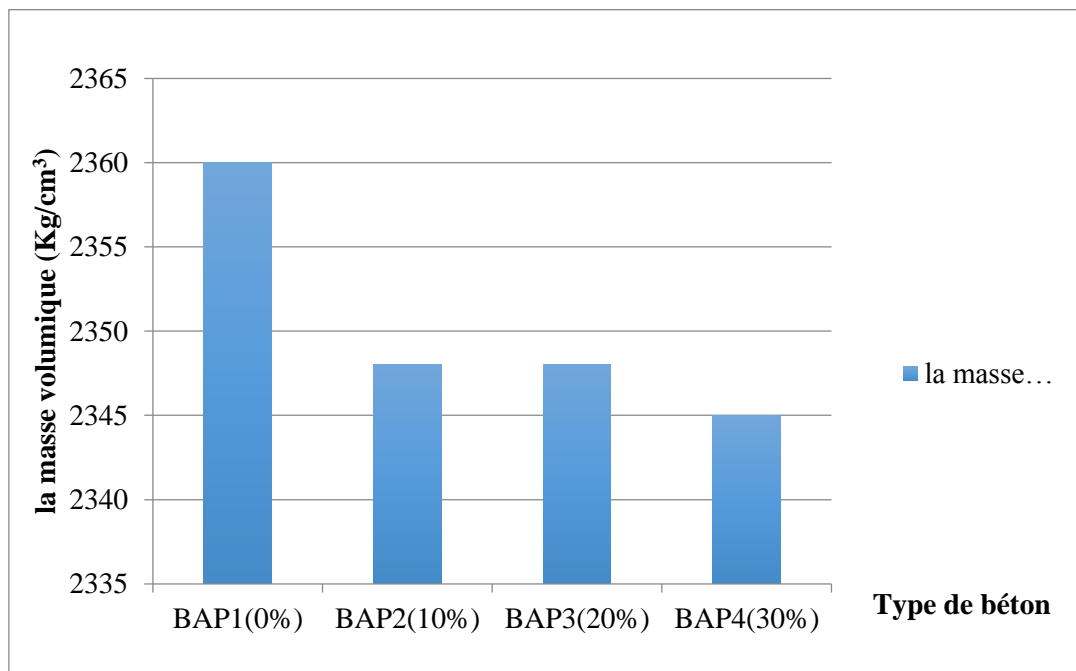


Fig VI. 4 La masse volumique en fonction des types bétons (BAP)

Remarque :

On note d'après les résultats obtenus dans l'énoncé que la masse volumique de BAP (tous les bétons avec les différents pourcentages de déchets de verre sont inférieurs à la masse volumique de BAP sans verre. Parce que la masse volumique du sable est 2,53 g/cm³ plus grande que la masse volumique du verre 2,37 g/cm³.

Ce qui correspond aux résultats du chapitre 4. Remplacer le sable par du verre est positif en termes de poids du béton.

2. Résultats des essais à l'état durci :

Les moules utilisés pour la confection des éprouvettes sont de forme : Cubique (10x10x10cm), Prismatique (7x7x28 cm)

Après le démoulage les éprouvettes doit être conservées sous l'eau à une température de 20°C.

Les essais de compression et de traction par flexion après 28 j et après exposition de haute température (200°,400°,600°)

2.1 La résistance à la compression :

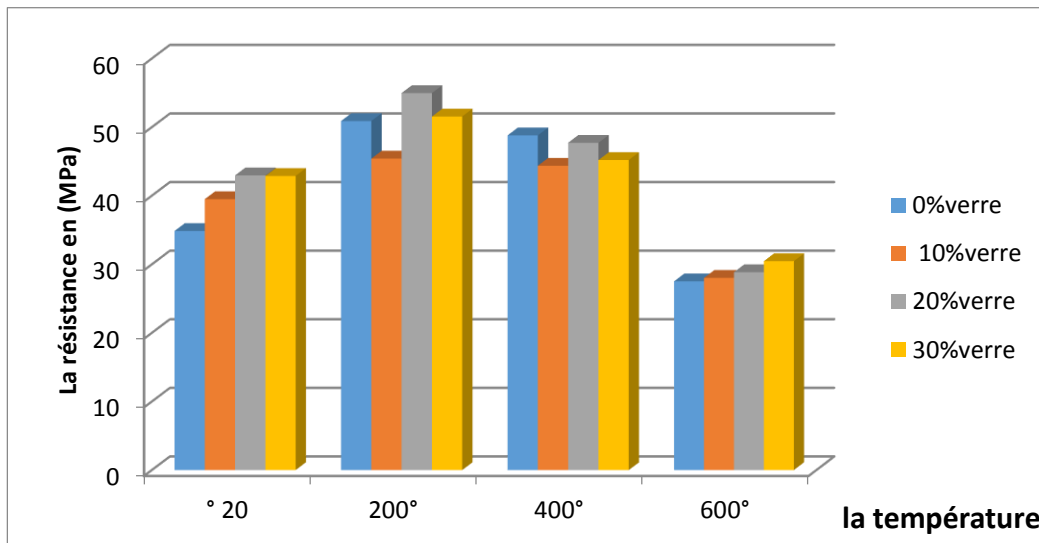


Fig VI. 5 La résistance à la compression en fonction de l'âge de béton.

Remarque :

L'ajout de verre au béton améliore considérablement sa résistance à la compression à des températures basses et modérées, et réduit les effets négatifs de l'élévation de température, particulièrement à 200° et 400°. À des températures très élevées (600°), les performances convergent mais le béton avec 30% de verre reste le plus performant.

2.2 La résistance à la traction par flexion :

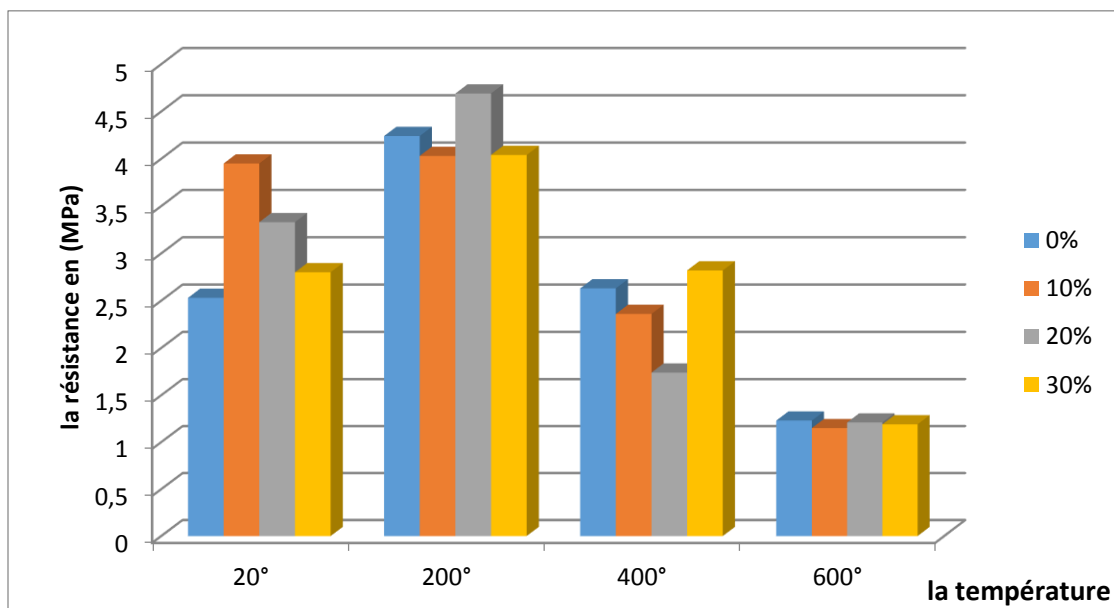


Fig VI. 6 La résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge des bétons

Remarque :

Nous remarquons que l'ajout de déchets de verre aux taux (10 %, 20 %, 30 %) dans le béton augmente considérablement la résistance à la traction par flexion à des températures basses (20 °C, 200 °C). En revanche, à des températures élevées (400 °C, 600 °C), on constate une diminution significative de la résistance à la traction par flexion.

2.3 La perte de masse :

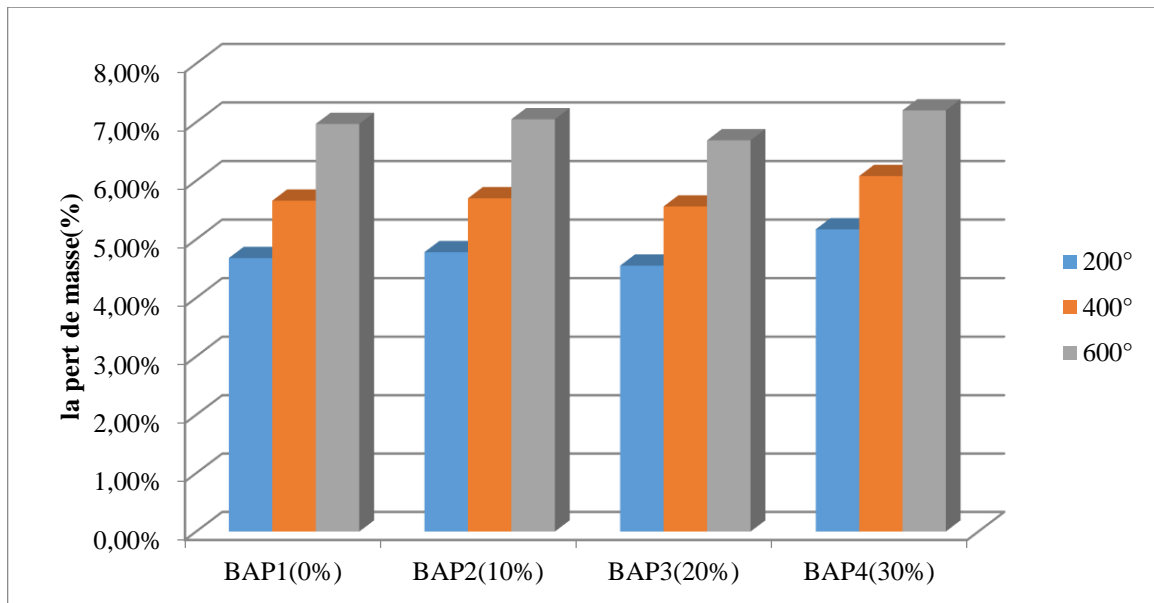


Fig VI. 7 La perte de masse

Remarque :

On observe que durant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la perte de la masse est presque similaire pour tous les bétons, alors on peut dire que la présence du verre dans le béton autoplaçant n'influe pas sur la perte de masse.

3. Comportement du verre utilisé dans le béton à la haute température :

Tableau VI. 2 Comportement du verre à haute température

La température	poids de verre (g)	poids de verre après exposition à la température(g)
200°	216	216
400°	216	216
600°	216	216

Remarque :

Nous avons observé qu'après exposition d'échantillons de verre (le verre utilisé dans le béton – Chapitre 4) aux mêmes températures élevées que celles auxquelles nous avons exposé le béton (200°C, 400°C, 600°C), aucun changement notable n'a été enregistré dans les propriétés physiques du verre aucun changement de masse ou de forme.



Fig VI. 8 Verre après exposition à la température 400°C



Fig VI. 9 Verre après exposition à la température 200°C



Fig VI. 10 Verre après exposition à la température 600°C

4. Conclusion :

Le sixième chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus, ainsi qu'à la discussion des avantages techniques du béton autoplaçant (BAP) et du béton autoplaçant avec incorporation de déchets de verre recyclé (10 %, 20 %, 30 %). Les résultats

Confirment l'efficacité de l'incorporation de granulats de verre recyclé dans la formulation du béton, notamment pour améliorer ses propriétés à l'état frais.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail de recherche, nous avons étudié l'effet de la substitution partielle du sable par du verre recyclé broyé dans le béton autoplçant (BAP), en analysant son comportement à l'état frais et à l'état durci, ainsi que son comportement après exposition à des températures élevées.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- **À l'état frais :**

L'ajout progressif de verre recyclé dans la composition du BAP contribue à améliorer la fluidité et la maniabilité du béton.

Les essais d'étalement au cône d'Abrams ont révélé une augmentation de l'étalement avec l'augmentation du taux de substitution, atteignant les valeurs maximales pour les formulations les plus riches en verre.

Tous les BAP étudiés respectent les critères de stabilité au tamis ($0 \leq \Pi \leq 15$) et satisfont les exigences de l'essai de la boîte en L (rapport $H2/H1 > 0,8$), confirmant ainsi leur bonne aptitude à la mise en place.

La masse volumique des BAP contenant du verre est légèrement inférieure à celle du béton de référence, traduisant ainsi un allègement du béton.

- **À l'état durci**

L'incorporation de verre recyclé a permis d'augmenter significativement la résistance à la compression à température ambiante ainsi qu'à 200°C et 400°C.

À 600°C, bien que les performances se rapprochent entre les différentes formulations, le béton contenant 30% de verre conserve la meilleure résistance à la compression.

La résistance à la traction par flexion s'est également améliorée avec l'ajout de verre, notamment aux basses températures.

La perte de masse constatée lors du chauffage est principalement due à l'évaporation de l'eau.

- **Comportement du verre à haute température :**

Aucune modification physique n'a été observée jusqu'à 600°C, ce qui confirme la stabilité thermique du verre recyclé et sa pertinence comme substitut du sable dans le béton autoplçant.

- Les résultats confirment l'avantage de l'utilisation des déchets de verre sous forme de grains dans BAP surtout à l'état frais des différents BAP étudiés.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques introduction générale :

- [1] Aimeur & Baghdadi. Caractérisation d'un béton auto-plaçant à base de poudre mémoire finale master 02 Université Mohamed Boudiaf _Msila 2022
- [2] SEDKI MERIEM (Etude expérimentale d'un béton à base de déchets de verre). mémoire de master. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU 2019

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITER I

- [1] Djiab & HAFFAF. L'effet de l'utilisation des résidus (les copeaux métalliques) dans la formulation des bétons auto-plaçant à l'Etat frais et durcis UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA 2020/2021
- [2] SAADALLAH & LAZREG. Etude Expérimentale d'un Béton Auto-plaçant à base de déchets de verre UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA .2024
- [3] GHARBI & FALI . Evaluation de la qualité des bétons auto -plaçant (BAP) exposés à haute température aux moyens des essais non-destructifs (END) et essais direct UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA 2018/2019
- [4] AGGOUNE ABDALLH, Evaluation de la qualité des bétons auto plaçant (BAP) fibré exposés à haute température aux moyens des essais non-destructifs (NDT) et essai direct ,mémoire finale master 02 Université Mohamed Boudiaf _Msila 2015
- [5] Aimeur & Baghdadi. Caractérisation d'un béton auto plaçant à base de poudre mémoire finale master 02 Université Mohamed Boudiaf _Msila 2022
- [6] Nacira , B; 2006. Etude des propriétés rhéologiques et mécanique des bétons autoplaçant
- [7] YAGOUB M., « Evaluation de la qualité du béton de fibres in situ cas de béton autoplaçant avec des fibres mixtes », Mémoire de Magister, Université Mohamed khider , Biskra, 2009.
- [8] Djebri, Noura. (Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant fibré à base de matériaux locaux exposé aux hautes températures). DOCTORAT SCIENCES Université Mohamed Boudiaf _Msila 13/05/2018
- [9] ZAIDI Hadj, SAADOUNE Lotfi " *Caractérisation mécanique d'un béton auto plaçant à partir d'un essai d'indentation*", Univ mohamed el bachir el ibraïm thèse de master 2020.

[10] CHAHBA MOUNA Hamza BELGHAIT Abderrahim « Elaboration D'un Béton Auto-Plaçant Léger » Mémoire Master UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA 2019/2020

NF EN 197-1, « *ciment, composition et critères* », l'association française de normalisation, Février 2001

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE II :

[1] Mr. CHELABI HAMZA Mr. TALEB ZAHIR Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre. 2016/2017

[2] Article L. 541-3 Code de l'Environnement - Livre V, Titre IV – chapitre 1er relatif à L'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. 2007-2017 Legi france p. (561-562)

[3] Article L. 541-1-1 Code de l'Environnement, Prévention et gestion des déchets 2007-2017 Legi-france p.(559)

[4] DJIAB NOR ELHOUDA & HAFFAF FAYZA L'effet de l'utilisation des résidus (les copeaux métalliques) dans la formulation des bétons autoplaçants à l'état frais et durcis 2020/2021

[5] CHELABI H , TALEB Z ., « Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre ». Mémoire de master , université de boira 2017

[6] Youcef Riadh LOUNIS & Abdennasser BENKHALED (DURABILITE DES MORTIERS A BASE DE MARBRE ET FIBRES RECYCLES) Blida, octobre 2021

[7] SAADALLAH & LAZREG. Etude Expérimentale d'un Béton Autoplaçant à base de déchets de verre UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).

[9] LARIBI ISLAM & BOURAHDOUN NASSEREDDINE « VALORISATION DES DECHET DANS LE BETON AUTO-PLAÇANT : ETAT DE L'ART » Mémoire de Master 'Université 8 Mai 1945 Guelma Septembre 2020

[10] FERGUENE HABIB . Valorisation des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans la formulation des bétons autoplaçants. Mémoire fin d'étude de Master. Boumerdes 2016

[11] SAADANI Sabrina « Comportement des bétons à base de granulats recyclés » thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine.

[12] : François PERCHE « adsorption des poly carboxylates et de lignosulfates sur poudre modèle et ciments » Thèse de doctorat.

[13] : document d'une entreprise canadienne qui travaille en Algérie.

[14] NF EN 934-2(sept.2002), adjuvant pour béton, mortier et coulis.

[15] AICHOUCH Amine et BELKBIRE Hocine « élaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique» DEUA Boumerdes 2011.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE III :

[1] ZOUBIRI AMINA (Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet del'âge MEMOIRE MASTER Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2015/2016

[2] HACHEMI Samia -Thèse de Doctorat étude du comportement du béton soumis à haute température UNIVERSITE DE MOHAMED KHIDER BISKRA.2015

[3] BENKHALFA Khalid & ZALANI Mohammed (Comportement du béton autoplaçant à haute température)

Mémoire Master l'Université de Guelma Juin 2015

[4] GHARBI & FALI . Evaluation de la qualité des bétons auto -plaçant (BAP) exposés à haute température aux moyens des essais non-destructifs (END) et essais direct

[5] Nonna Yermak «Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres », Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole doctorale de Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2015.

[6] Noumowé, A. "Effet Des Hautes Températures (20-600°C) Sur Le Béton. Cas Particulier Du Béton à Hautes Performances." Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 1995.

[7] Castellote, M., C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas, and J. Campo. "Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction." *Cement and Concrete Research* n°9 34:1633–44. 2004.

[8] Alarcon-Ruiz, L., G. Platret, E. Massieu, and A. Ehlacher. "The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste." *Cement and Concrete Research* 35:609–13. 2005.

[9] Schneider, U., U. Diederichs, and C. Ehm. "Effect of Temperature on Steel and Concrete for PCRVS." *Nuclear Engineering and Design* 67:245–58. 1982.

[10] Alonso, C. and L. Fernandez. "Dehydration and Rehydration Processes of Cement Paste Exposed to High Temperature Environments." *Journal of Materials Science* 39:3015–24. 2004.

[11] Nguyen, VT. "Comportement Des Bétons Ordinaire et à Hautes Performances Soumis à Haute Température : Application à Des éprouvettes de Grandes Dimensions." Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2013.

- [12] Laneyrie, C. “Valorisation Des Déchets de Chantiers Du BTP : Comportement à Haute Température Des Bétons de Granulats Recyclés.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2014.
- [13] Mindeguia, J. C. “Contribution Expérimentale à La Compréhension Des Risques D’instabilité Thermique Des Bétons.” Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l’Adour. 2009.
- [14] Xing, Z. “Influence de La Nature Minéralogique Des Granulats Sur Leur Comportement et Celui Du Béton à Haute Température.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2011.
- [15] Djebri,Noura. (Formulation et caractérisation d’un béton autoplaçant fibré à base de matériaux locaux exposé aux hautes températures). DOCTORATSCIENCES Université Mohamed Boudiaf _Msila 13/05/2018

Références Bibliographiques CHAPITRE IV :

- [1] Fiche technique de MEDAFLOW
- [2] Melle Naima REBBOUH (Formulation et caractérisation d’un béton autoplaçant) Ecole nationale Polytechnique 2006
- [3] Aimeur & Baghdadi. Caractérisation d'un béton auto plaçant à base de poudre mémoire finale master 02 Université Mohamed Boudiaf _Msila 2022

Références Bibliographiques CHAPITRE V :

- [1] Soufienne, M. O. S. T. E. F. A. I. (2019). *Evaluation de la qualité des bétons autoplaçant (BAP) fibrés aux moyens des Essais Non-Destructifs (END) et essai direct* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA).
- [2] Norme NF EN12 350-8 Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams, AFNOR, 2010.
- [3] Norme NF EN 12 350-10 Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L, AFNOR, 2010.
- [4] Norme NF EN 12350-11 Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis, AFNOR 2010.
- [5] Norme NF EN 12390-3 ; Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR, juin 2019
- [6] Norme NF EN 12390-5; Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes,

A large, light green rounded rectangle with a thin dark green border, centered on the page. The word "Annexes" is written in bold black serif font inside it.

Annexes



SPA BISKRIA CIMENT



FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5R CIMENT PORTLAND

CEM I 42.5R Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid

CEM I 42.5R :

Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :


















- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté



✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment 	Sable (sec) 0/5 	Gravillons ^(sec) 8/15mm 15/25mm 	Eau (litres) 
Dosage pour béton	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 25 L
	ciment 	Sable Correcteur 0/1mm 	Sable (sec) 0/4mm 	Eau (litres) 
Mortier de briquetage	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 35 L
Mortier de finitions	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 35 L

Remarque: un bidon = 10 litres

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2,6 – 3,7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2,2 – 2,8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1,7 – 2,8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0,03 – 0,07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₂ A	5,1 – 7,2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25,8 – 26,4
Expansion à chaud (mm)	0,25 – 1,0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42,5 – 52,5



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT
Adresse : Djar Belahrache
Branis, Biskra Algerie

Tel : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 558 108
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

