

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Présenté par :

LARIBI ISLAM

BOURAHDOUN NASSEREDDINE

**Thème : VALORISATION DES DECHETS DANS LE
BETON AUTO-PLAÇANT : ETAT DE L'ART**

Sous la direction de : Dr. KECHKAR Chiraz

Septembre 2020

Remerciements

Avant de présenter ce travail , Nous remercions profondément ALLAH, le Très Haut, le tout puissant de nous avoir donné la vie, la santé, la sérénité et les capacités pour mener à terme ce mémoire de fin d'études .

Nous tenons à exprimer nos plus sincères et chaleureuses Remerciements et gratitude pour notre encadreur , Docteur Kechkar Chiraz qui nous a tellement aidés pour réaliser notre modeste travail avec ses conseils éclairés , sa constante disponibilité et sa grande qualité humaine .

Nous remercions également aux membres de jury qui nous font l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions à l'ensemble du corps enseignants et administratif du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 Mai 45 de Guelma.

Nos remerciements les plus profonds pour nos chères parents pour leur soutien moral indéfectible et leurs encouragements.

Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

RESUME

Dans le but de conserver les ressources naturelles, protéger l'environnement, et rationaliser la consommation en énergie, il apparaît opportun d'étudier la possibilité de recycler certains déchets générés par les différentes activités industrielles et autres, dans les filières du béton.

Pour cela, plusieurs recherches ont été réalisées pour étudier la possibilité de valoriser les déchets comme ajout dans la formulation des bétons auto-plaçant

Dans ce travail de mémoire de fin d'études, nous nous proposons, à travers une recherche bibliographique détaillée, d'étudier le potentiel de valorisation des déchets, dans le domaine de la construction, particulièrement dans la fabrication des bétons auto-plaçant. C'est une étude comparative entre des résultats des recherches déjà réalisées qui ont pour objectif d'intégrer les fines des déchets dans la composition des BAP, et d'étudier leurs influences sur le comportement des bétons auto-plaçant à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

MOTS CLES : recyclage – déchets – béton auto-plaçant – état frais – état durci.

Abstract

For the purpose of maintaining natural resources, protecting the environment and rationalizing energy consumption, it appears timely to explore the possibility of recycling all the waste generated from different industrial activities and others of concrete deads.

In that regard, several researches have been carried out to study the possibility of valorizing waste as an addition to the formulation of self-consolidating concrete .

In this work of graduation memory, we propose through a detailed bibliographical study, to investigate the possibility of valorizing waste recovery, in the field of construction particularly the formulation of self-consolidating concrete. It is a comparative study between the results of researches already accomplished that aim at the integration of fine waste in the composition of BAP, and to study thier effects on the behavior of self-consolidating concrete, at its fresh as well as hard state.

Key words: recycling – waste – self-consolidating concrete – fresh state – hard state

ملخص

لغرض الحفاظ على الموارد الطبيعية ، حماية البيئة وترشيد استهلاك الطاقة ، يبدو انه الوقت المناسب لاكتشاف إمكانية إعادة تدوير جميع النفايات الناتجة عن الأنشطة الصناعية المختلفة وغيرها من النفايات الخرسانية

في هذا الصدد ، تم إجراء العديد من الأبحاث لدراسة إمكانية تثمين النفايات كإضافة لصياغة الخرسانة ذاتية الصب

في هذا العمل الخاص بمذكرة التخرج ، نقترح من خلال دراسة بيبليوغرافية مفصلة ، للتحقق في إمكانية تثمين استعادة النفايات ، في مجال البناء وخاصة صياغة الخرسانة ذاتية الصب. إنها دراسة مقارنة بين نتائج الأبحاث التي تم إجراؤها بالفعل والتي تهدف إلى دمج غرامات النفايات في تكوين الخرسانة ذاتية الصب ودراسة تأثيرها على سلوك الخرسانة ذاتية الصب في الحالة الجديدة أيضًا. و في الحالة الصلبة

الكلمات الرئيسية: إعادة التدوير - النفايات - الخرسانة ذاتية الصب - الحالة الطرية - الحالة الصلبة

Sommaire

<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>I</i>
<i>RESUME</i>	<i>II</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>III</i>
ملخص	<i>IV</i>
<i>SOMMAIRE</i>	<i>V</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>IX</i>
<i>LISTES DES TABLEAUX</i>	<i>X</i>
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>I</i>

CHAPITRE I LES BETONS AUTO-PLAÇANTS

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. DEFINITION DU BETON AUTOPLAÇANT	4
I.3. HISTORIQUE	5
I.4. LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BAP	6
I.5. LE BETON AUTO_PLAÇANT TANT QUE MATERIAU	7
I.6. LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES BAP	8
I.7. FORMULATION DES BAP	11
I.7.1. Méthode japonaise	12
I.7.2. L'approche suédoise	12
I.7.3. Formulation par volume de pâte minimal.....	13
I.7.4. Formulation par optimisation du squelette granulaire	13
I.7.5. Méthode basée sur un plan d'expérience	13
I.8. PRATIQUE ACTUELLE DE LA FORMULATION	14
I.9. LES CARACTERISTIQUES DES BAP A L'ETAT FRAIS	15
I.9.1. Mobilité en milieu non confiné.....	15
I.9.2. Mobilité en milieu confiné.....	18
I.9.3. La stabilité.....	19
I.10. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT DURCI	20
I.10.1 Propriétés mécaniques	20
I.10.1.1 Les essais de compression	20
I.10.1.2 Les essais de traction par flexion.....	21
I.10.1.3 Module d'élasticité.....	22
Référence bibliographique	23

CHAPITRE II VALORISATION DES DECHETS

II.1. INTRODUCTION.....	26
II.2. DEFINITION.....	26
II.3. LES DIFFERENTS TYPES DE DECHETS	27
II.3.1. Déchets ultimes.....	27
II.3.2. Déchets ménagers et assimilés	28
II.3.3. Déchets inertes.....	28
II.3.4. Déchets dangereux.....	28
II.3.5. Les déchets industriels banals (DIB)	29
II.3.6. Les médicaux et pharmaceutiques	30
II.4. Gestion des déchets	30
II.4.1. Définition.....	30
II.4.2. Principes de gestion des déchets	30
II.4.3. Méthodes de gestion des déchets	31
II.4.3.1 L'enfouissement	32
II.4.3.2. L'incinération.....	32
II.4.3.3 La décharge contrôlée	33
II.4.3.4 Le compostage	33
II.4.3.5 Le recyclage	34
II.5. différents déchets utilisés dans l'élaboration des bétons et des mortiers.....	35
II.5.1.1 Les Laitiers sidérurgiques	35
II.5.1.2 Laitier d'acier	35
II.5.2. Cendres volantes	36
II.5.3. Déchets de verre.....	37
II.5.4. Pneus usagés.....	37
II.5.5. Ciment durci.....	38
II.5.6. Déchets de démolition.....	39
II.5.7. Déchets de production de l'industrie du béton	39
II.5.8. Déchets de briques	40
II.5.9. Sables de fonderies.....	41
II.5.10. Déchets plastiques.....	42
II.5.11. Déchets de marbre.....	43
II.5.12. Boues rouges	44
Références bibliographiques	45

CHAPITRE III ETUDE DES BAP A BASE DES FINES RECYCLES

III.1. INTRODUCTION	46
III.2. CARACTERISTIQUES DES DECHETS UTILISE	48
III.2.1. Les caractéristiques physiques	48
III.2.2. Les caractéristiques chimiques.....	50
III.3. FORMULATION DU BAP.....	52

III.4. LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS	53
III.4.1. Etalement au cône d'Abrams	53
III.4.2. Temps T ₅₀₀	54
III.4.3. Taux de remplissage dans la boîte en L	55
III.4.4. Stabilité au tamis	56
III.5. LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT DURCIS.....	58
III.5.1. Résistance à la compression	58
Référence bibliographiques	62
Conclusion générale	63

Liste des figures

Figure I.1. Mise en place d'un béton auto-plaçant (BAP).....	04
Figure I.2. Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton	07
Figure I.3. Pâte de ciment non adjuvantée	11
Figure I.4. Pâte de ciment d'un super-plastifiant additionnée.....	11
Figure I.5. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	15
Figure I.6. Essai d'étalement (slump flow).....	16
Figure I.7. Essais des Entonnoirs	17
Figure I.8. Schéma de la boîte en L	18
Figure I.9. Essai d'étalement.....	19
Figure I.10. Essais des Entonnoirs	19
Figure I.11. Essai au tamis... ..	20
Figure I.12. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant	21
Figure I.13. Résistance mécanique d'un béton vibré et de 2 BAP	21
Figure I.14. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales	22
Figure II.1. Déchets inertes.....	28
Figure II.2. Enfouissement des déchets... ..	32
Figure II.3. Incinération en plein air et usine d'incinération... ..	33
Figure II.4. Photo d'une décharge contrôlée	33
Figure II.5. Compostage de déchets organiques... ..	34
Figure II.6. Usine de recyclage des déchets... ..	34
Figure II.7. Photo d'un laitier de haut fourneau... ..	35
Figure II.8. Photo d'un laitier d'acier... ..	36
Figure II.9. Photo de la cendre volante	36
Figure II.10. Déchets de verres... ..	37
Figure II.11. Déchets de pneus usagés.....	38
Figure II.12. Ciment durci.....	39

Figure II.13. <i>Déchets de démolition</i>	39
Figure II.14. <i>Industrie du béton</i>	40
Figure II.15. <i>Briques en terre crue</i>	41
Figure II.16. <i>Briques en terre cuite</i>	41
Figure II.17. <i>Sable de fonderies</i>	42
Figure II.18. <i>Déchet plastiques</i>	43
Figure II.19. <i>Déchets de marbres et déchets de marbre broyés</i>	44
Figure II.20. <i>Boues rouges</i>	44
Figure III.1. <i>Filler calcaire</i>	46
Figure III.2. <i>Laitier</i>	47
Figure III.3. <i>Poudre de verre</i>	47
Figure III.4. <i>Valeurs de la masse volumique absolue du ciment et des déchets étudiés</i>	48
Figure III.5. <i>Valeurs de la masse volumique apparente du ciment et des déchets étudiés</i> ...	49
Figure III.6. <i>Valeurs de la surface spécifique Blaine du ciment et les différents déchets étudiés</i>	50
Figure III.7. <i>Influence du dosage en addition sur l'étalement</i>	53
Figure III.8. <i>Influence du dosage en addition sur le temps T_{500}</i>	55
Figure III.9. <i>Influence du dosage en addition sur le taux de remplissage dans laboite en L</i> ..	56
Figure III.10. <i>Influence du dosage en addition sur la résistance à la ségrégation</i>	57
Figure III.11. <i>Influence du dosage des additions sur la résistance à la compression à 2 jours</i>	58
Figure III.12. <i>Influence du dosage des additions sur la résistance à la compression à 7 jours</i>	59
Figure III.13. <i>Influence du dosage des additions sur la résistance à la compression à 28 jours</i>	60

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1. Essai d'étalement (slump flow)</i>	16
<i>Tableau I.2. Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9</i>	17
<i>Tableau I.3. Taux de remplissage dans la boîte en L</i>	18
<i>Tableau I.4. Etalement à l'anneau</i>	19
<i>Tableau I.5. Stabilité au tamis</i>	20
<i>Tableau III.1. Valeurs des masses volumiques absolues des déchets utilisés</i>	48
<i>Tableau III.2. Valeurs des masses volumiques apparentes des déchets utilisés</i>	49
<i>Tableau III.3. Valeurs des surfaces spécifiques Blaine des déchets utilisés</i>	49
<i>Tableau III.4. Composition chimique du filler calcaire</i>	50
<i>Tableau III.5. Composition chimique du laitier</i>	50
<i>Tableau III.6. Composition chimique de la poudre de brique</i>	51
<i>Tableau III.7. Composition chimique de la poudre de verre</i>	51
<i>Tableau III.8. Composition chimique du ciment</i>	51
<i>Tableau III.9. Les différentes formulations des BAP étudiées</i>	52
<i>Tableau III.10. Valeurs d'étalement pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	53
<i>Tableau III.11. Valeurs du temps T_{500} pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	54
<i>Tableau III.12. Valeurs des taux de remplissage pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	55
<i>Tableau III.13. Valeurs de l'essai de stabilité pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	57
<i>Tableau III.14. Valeurs de la résistance à la compression à 2 jours pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	58
<i>Tableau III.15. Valeurs de la résistance à la compression à 7 jours pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	59
<i>Tableau III.16. Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours pour les différentes compositions des BAP étudiées</i>	60

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque là destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR).

Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie avec les bétons auto-plaçant (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. D'autre part, le champ d'utilisation des BAP est très varié du point de vue de la résistance mécanique (des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances) comme du point de vue des applications visées (des bâtiments aux ouvrages d'art). Ceci confirme l'existence des BAP en tant que bétons de structure à part entière.

L'utilisation des déchets recyclés s'est développée au début des années 80, elle répond au besoin d'une autre source de granulats et de la réduction des volumes de déchets.

L'utilisation des déchets recyclés dans les bétons présente plusieurs avantages tant au niveau environnementale, humain, technologique et économique qui s'intéresse de plus en plus les industriels.

Les déchets peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers des travaux publics ou encore en d'autre application dans le domaine de la construction, en particulier, comme granulats pour le béton.

Le but de ce travail est de discuter la faisabilité du remplacement partiel des fillers calcaires par des fines recyclées de nature différente tel que la poudre de brique, poudre de verre et le laitier de haut fourneau dans la fabrication des bétons auto-plaçant.

Pour cela, et sur des résultats tirés de la littérature, une étude comparative des comportements rhéologique et mécanique de trois séries de BAP formulés avec des fines recyclés de nature différente a été réalisée.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre 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.

Le deuxième chapitre est consacré à la valorisation des déchets, leurs natures et leurs provenance ainsi les différents déchets utilisés en génie civil principalement dans l'élaboration des bétons et des ciments composés.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré pour la présentation et la discussion des résultats des essais réalisés déjà sur les bétons auto-plaçant modifiés.

Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I LES BETONS AUTO-PLACANTS

CHAPITRE I

LES BETONS AUTO-PLACANTS

I.1. INTRODUCTION :

Dans les années quatre-vingt, des études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculant et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines a conduit aux gains de résistance et à l'amélioration de la durabilité. De plus, l'ouvrabilité de ces bétons a été également développée quasiment maîtrisée.

Aujourd'hui, la plus part des recherches sont orientées vers un autre type de béton constituant une véritable révolution dans le domaine des bâtiments et travaux publics : c'est le béton auto-plaçant (BAP).

Le béton auto-plaçant (BAP) est un nouveau béton qui intéresse beaucoup l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Ceci est dû aux nombreux avantages qu'il présente : un écoulement sous son propre poids et sans aucune vibration même dans les milieux à forte densité de ferrailage. Ainsi, le BAP est utilisé dans de nombreux pays pour diverses applications et configurations structurelles. Dans les paragraphes suivants on décrira les principales caractéristiques de ce type de béton à l'état frais, à l'état durci et vis à vis de la durabilité.

Aujourd'hui le BAP est utilisé dans le monde entier, même en Amérique et en Afrique dans plusieurs constructions (les bâtiments civils et industriels, les ponts, les barrages, et les travaux et les renforcements).



Figure I.1. Mise en place d'un béton auto-plaçant (BAP).

I.2. DEFINITION DU BETON AUTOPLAÇANT :

Un béton auto-plaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration [1].

Le béton auto plaçant (dénommé aussi auto compactant) est défini comme suit dans l'Annexe nationale NA de la norme SN EN 206-1 :

Le béton frais est appelé auto-plaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas de ségrégation. Le BAP et le béton vibré se différencient par les propriétés du béton frais et le mode de mise en œuvre [2].

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

Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les suivantes :

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation (comme du miel),
- désaération du béton pendant son écoulement,
- excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense,
- Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé [3].

I.3. HISTORIQUE :

Pendant plusieurs années commençantes en 1983, le problème de la durabilité des structures en béton était un sujet d'intérêt majeur surtout au japon, il est considéré comme un problème majeur auquel la société japonaise fait face. Surtout que le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton [4].

L'utilisation de béton très fluide, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme solution possible à ce problème.

La nécessité de tel sorte du béton est proposé par OKAMURA en 1986, et en 1988, Ozawa a réussi de développer le 1er prototype du béton auto-plaçant BAP. Ces résultats ont été présentés par K. OZAWA pour la première fois au 2ème Congrès de l'Asie de l'Est et Pacifique sur le Génie Civil et la Construction, tenu en Janvier 1989 à Chiangmai (Thaïlande). Trois années plus tard, en Mai 1992, au 4ème Congrès International CANMET & ACI à Istanbul, l'intervention du K. OZAWA a accéléré la diffusion mondiale du concept de cette nouvelle génération de béton [1].

Dans les dernières années, le BAP a été développé un peu partout dans le monde, et les données disponibles à leur sujet commencent par conséquent à affurer dans la littérature.

En France les premières expérimentations remontent à 1995. Après une phase de recherche développement menée dans le cadre du Projet National, les BAP s'affirment aujourd'hui comme une technique porteuse.

En Europe, ont formé un grand consortium en 1996 pour s'embarquer à un projet de développement du BAP et leur application. Et dans les dernières années, un certain nombre de ponts, de tunnels ont été construits.

Aux USA, le BAP à gagner un très grand intérêt surtout de la part des industries du béton préfabriqué, ils ont commencés à l'appliquer dans les projets commerciaux, puis l'application a été étendue vers les ponts.

Donc, les bétons auto-plaçant (BAP) marquent une nouvelle étape de progrès dans l'histoire du matériau béton.

I.4. LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BAP :

➤ Les BAP présentent de nombreux avantages

a) Avantages techniques :

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

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).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [Net1].

➤ Comme inconvénients, on distingue

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [5].

I.5. LE BETON AUTO_PLAÇANT TANT QUE MATERIAU :

Les BAP sont utilisés, puisqu'ils sont mis en place sans vibration, pour leur aptitude à remplir les coffrages les plus densément armés sans intervention extérieure. Cette caractéristique est communément appelée « capacité de remplissage ».

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation.

OZAWA et al [6] ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton.

Pour des valeurs d'affaissement plus élevés au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formulation de ponts de granulats reposant sur les obstacles : c'est la ségrégation.

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. La figure I.2 montre la relation entre les différentes caractéristiques du BAP.

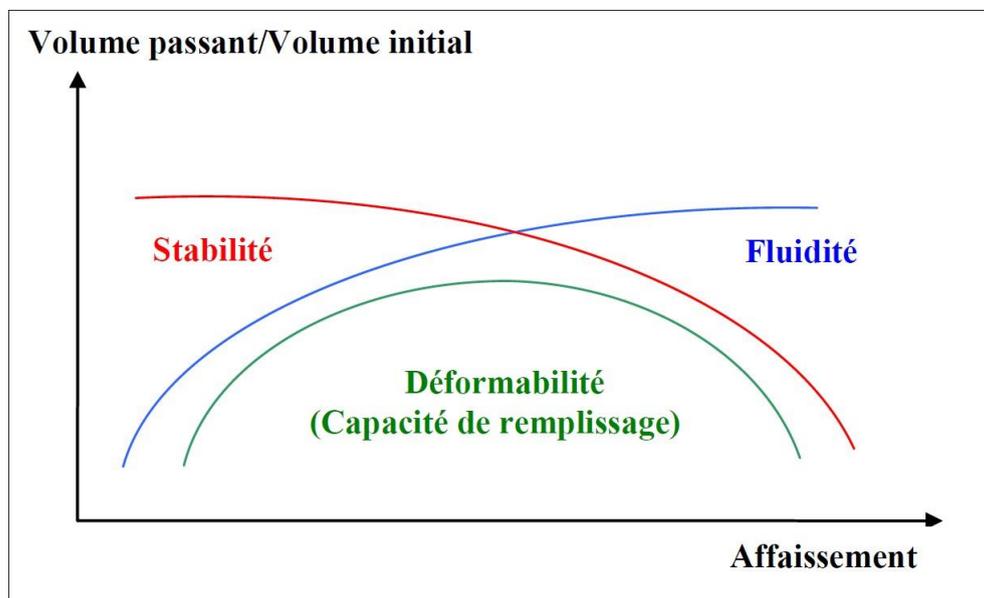


Figure I.2 Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton [6].

Le même auteur a montré que la déformabilité du béton était uniquement fonction de l'eau libre, eau non retenue, chimiquement ou physiquement, par les particules fines (ciment ou ajouts minéraux) ou le sable.

La résistance à la ségrégation dépend essentiellement de deux facteurs : la viscosité du mortier (ou de la pâte du ciment) et du volume des gros granulats [7]. En effet, UMEHARA et al [8] montrent qu'une diminution de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation. L'entraînement des granulats par le mortier est favorisé par les forces de viscosité, une augmentation de la viscosité minimise donc la ségrégation.

Le volume des gros granulats ainsi que leur taille maximale jouent un rôle non négligeable dans la résistance à la ségrégation. En effet, les collisions et les frictions intergranulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats dans le béton [6].

La composition des BAP doit donc inclure des constituants supplémentaires et des dosages différents par rapport à ce qui est pratiqué pour les bétons vibrés pour présenter ces qualités de déformabilité et de résistance à la ségrégation. Nous abordons dans le paragraphe suivant la composition et la formulation de ces bétons.

I.6. LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des bétons ordinaires. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix, étant donné le mode de mise en place des BAP, il convient de porter une attention particulière au type de liant ainsi qu'à la granulométrie des gravillons si l'on désire obtenir de meilleures qualités de béton. Généralement, on peut diviser 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 [9].

a. 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.

- **Les granulats**

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (< 0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé. Partir de plusieurs fractions [10].

- **Le ciment**

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

- **L'eau de gâchage**

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton Auto-plaçant.

Étant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'auto-plaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

b. Additions minérales

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage (par rapport au béton vibré).

Pour obtenir ces propriétés et pour un meilleur arrangement granulaire, on ajoute de fortes teneurs en additions minérales

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

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

c. Adjuvants chimiques

▪ Les super-plastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée.

Le mode d'action des super-plastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit :

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment 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.

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 du ciment et libère l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité [11].

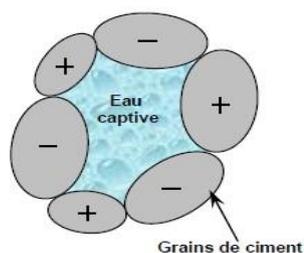


Figure I.3. Pâte de ciment non adjuvante

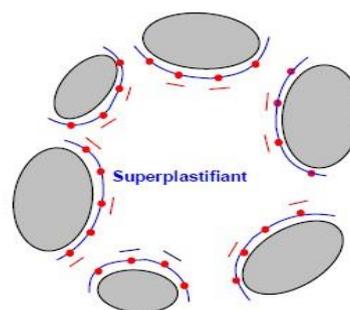


Figure I.4. Pâte de ciment d'un super-plastifiant Additionnée [11].

▪ Les agents colloïdaux (agent de viscosité)

Généralement les fluidifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité (qui se présentent généralement sous forme de poudre) ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle modificateur peut aller du simple épaissement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP.

I.7. FORMULATION DES BAP :

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des BO. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut assurer, en plus de l'étalement, la capacité de remplissage et la stabilité. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation [9].

Depuis l'invention du BAP, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée. De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales [5].

I.7.1. Méthode japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. 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 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

b). **Dosage du sable** : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

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 (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d). **Dosage de l'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 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [5].

I.7.2. L'approche suédoise

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du super-plastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche permet une meilleure

optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [5].

I.7.3. Formulation par volume de pâte minimal :

Dans cette méthode le béton est considéré comme un matériau bi-phasique, une phase solide constitué par les granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvants).

Les chercheurs supposent que la pâte joue deux rôles principaux dans un BAP : D'une part, elle assure la fluidité du mélange, ce qui limite les frottements entre les granulats, d'autre part elle écarte les gravillons pour éviter le phénomène de blocage. Pour assurer ces deux rôles les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte [12].

I.7.4. Formulation par optimisation du squelette granulaire

Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons est basée sur l'optimisation de la porosité du système, en prenant en considération tous les grains solides, du ciment aux gravillons. Si la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on optimise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple montre donc le lien entre compacité et rhéologie [12].

I.7.5. Méthode basée sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. KHAYAT et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants :

Le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de super-plastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Même si ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude, cette approche fournit

surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

I.8. PRATIQUE ACTUELLE DE LA FORMULATION :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation, les dosages en super-plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum, soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages.

Ainsi en termes de constituants, là aussi on constate une différence entre le béton traditionnel (BO) et le BAP, en effet celui contient plus comme le montre la figure suivante :

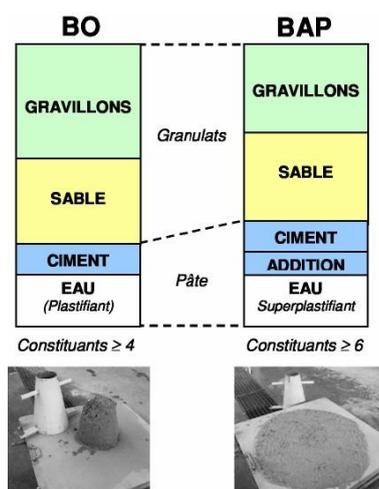


Figure I.5. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.
Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

I.9. LES CARACTERISTIQUES DES BAP A L'ETAT FRAIS :

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités qu'on espère. Pour cela, il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais.

Le béton auto-plaçant à l'état frais et à l'état durci a fait l'objet de nombreuses recherches depuis le début des années nonante. Celles-ci ont permis de mettre au point ou d'adapter les procédures pour la détermination de certaines caractéristiques. Parmi les essais les plus utilisés pour la caractérisation des bétons auto-plaçant à l'état frais sont:

I.9.1. Mobilité en milieu non confiné

a) L'essai de l'étalement :

L'essai d'étalement est largement utilisé, car il est facile à mettre en œuvre. L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité de déformation des bétons sous leur propre poids. Si le diamètre est grand, le béton est fluide tout en gardant sa stabilisation (aucune ségrégation). Ayed K. et al [13] ont donné certaines observations complémentaires sur cet essai :

- ✓ Les bords de la galette donnent une indication sur le ressuage ;
- ✓ Le traçage à la truelle des lignes sur la galette, nous permet d'observer la manière de l'écoulement des BAP ;
- ✓ La forme plus ou moins bombée de la galette indique l'homogénéité ou non du BAP.

Ainsi, on considère l'essai de l'étalement comme un test de base pour contrôler la qualité des BAP [14].

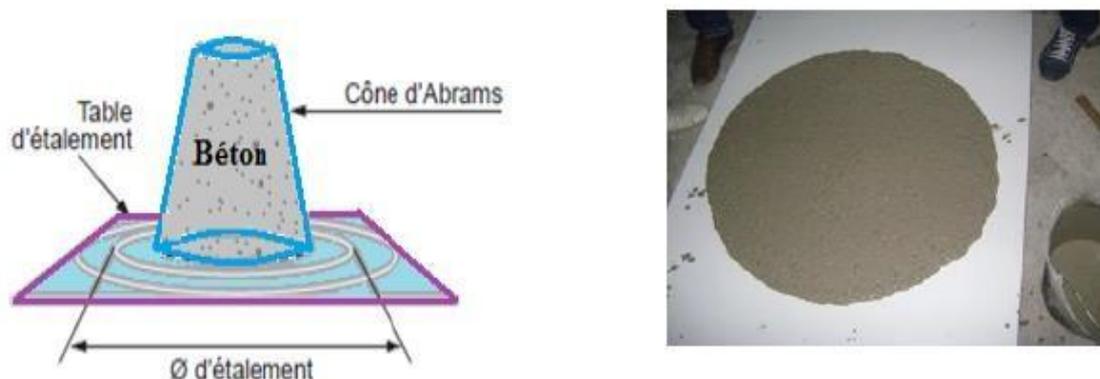


Figure 1.6. Essai d'étalement (slump flow).

Tableau I.1. Essai d'étalement (slump flow) [15].

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

- la **classe SF1** est souvent appropriée :
 - aux structures en béton non ou faiblement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de remplissage
- la **classe SF2** est appropriée à de nombreuses applications courantes
- la **classe SF3** est normalement produite avec un diamètre maximum des granulats peu élevé (inférieur à 16 mm) et est utilisée pour des applications verticales dans des structures qui comportent un ferrailage dense, ou qui sont de formes complexes [15].

b) Essai de l'entonnoir

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou Vfunnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des BAP.

Un entonnoir de dimensions définies est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert. On mesure le temps (T_v) que met le béton à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide.

Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 8 et 14 secondes, caractérise la viscosité du béton. Si le béton s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible.

Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du BAP que celle de l'écoulement. La forme de cône inversée fera bloquer l'écoulement du béton si, par exemple il y a trop gros granulat. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement inter granulaire élevé.

La norme définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V funnel):

Tableau I.2. Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9 [15]

Classe	Temps (seconde) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
VF1	< 9,0
VF2	9,0 à 25,0



Figure I.7. Essais des Entonnoirs [14].

I.9.2. Mobilité en milieu confiné

a) Essai de boîte en L :

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 3 barres d'armature \varnothing 14 mm distantes de 39mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale.

Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'auto nivellement. Le rapport h_2/h_1 devrait être supérieur à 0,80. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini [14].

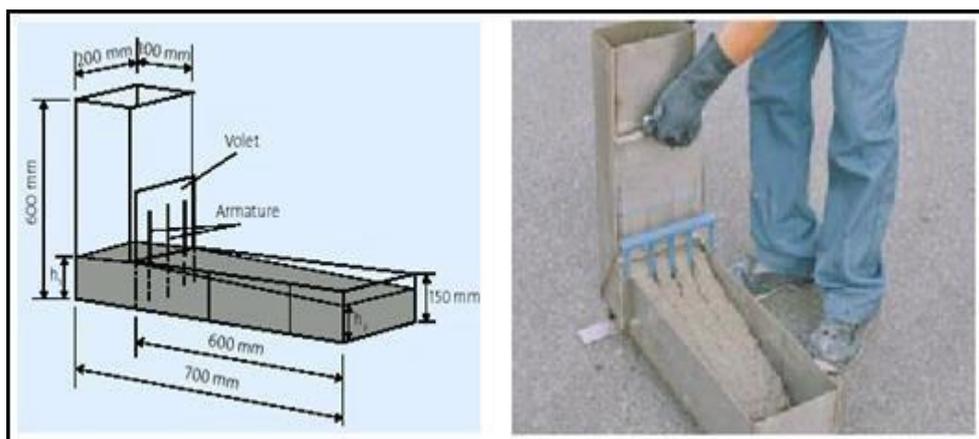


Figure I.8. Schéma de la boîte en L [14].

Tableau I.3. Taux de remplissage dans la boîte en L [15].

Classe	Taux de remplissage
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

- **PL1** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100 mm
- **PL2** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80 mm.

b) Essai d'étalement modifié (J-Ring) :

L'essai d'étalement modifié fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur de l'anneau [16].

Tableau I.4. Etalement à l'anneau [15].

Classe	Palier de l'étalement à l'anneau (mm) (valeurs limites applicables aux charges individuelles)
Pj1	≤ 10 avec 12 armatures
Pj2	≤ 10 avec 16 armatures



Figure I.9. Essai d'étalement



Figure I.10. Essais des Entonnoirs [14].

I.9.3. La stabilité

L'essai de stabilité au tamis appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons auto-plaçant, il vise à qualifier les bétons auto-plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [17].

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 (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 auto-plaçant sont divisés en trois classes [18] :

Tableau I.5. Stabilité au tamis [15].

Classe	Pourcentage de laitance
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15



Figure 1.11. Essai au tamis [17].

I.10. PROPRIETES DES BAP A L'ETAT DURCI :

I.10.1. Propriétés mécaniques

I.10.1.1. Résistance à la compression

Diverses études comparent l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires à celle des bétons vibrés. Ces auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler [19].

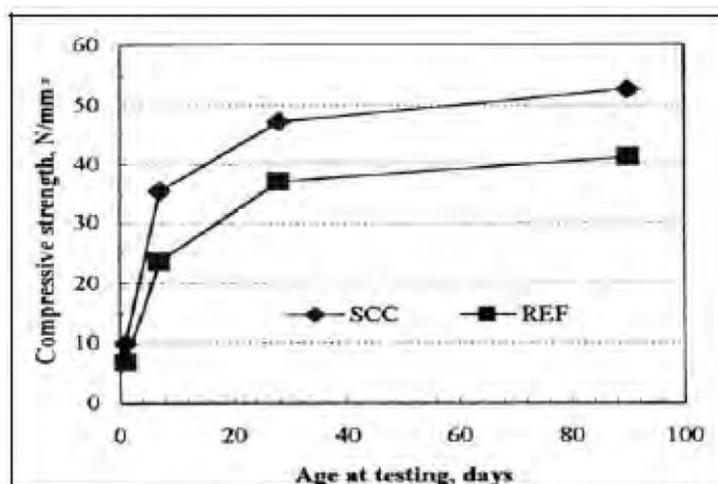


Figure I.12. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV correspondant [20].

Pour PETERSSON [21], cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante.

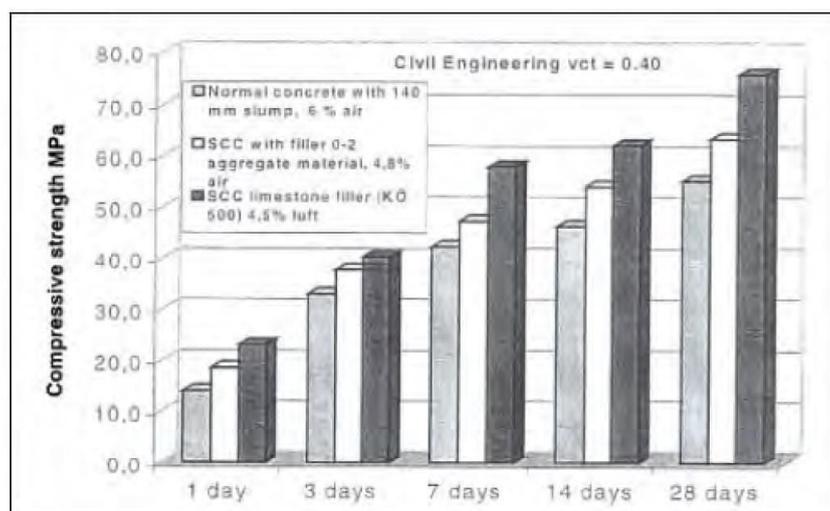


Figure I.13. Résistance mécanique d'un béton vibré et de 2 BAP [21].

I.10.1.2. Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [22]. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de

l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

Pour certains auteurs [22, 23], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par PINEAUD [24]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

I.10.1.3. Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton auto-plaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré [25].

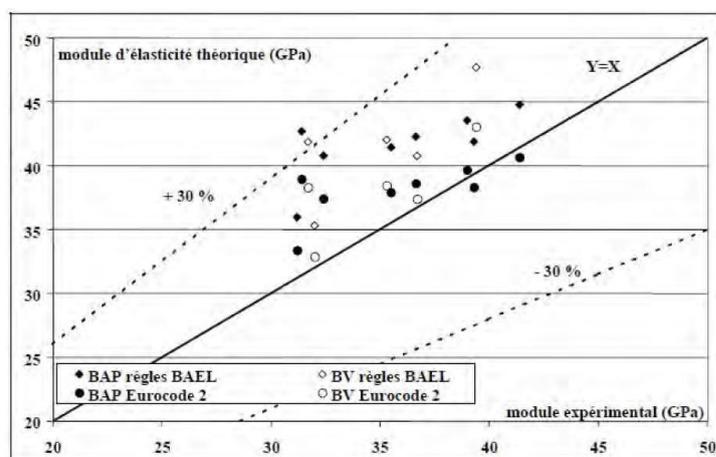


Figure I.14. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [19].

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [19].

Des chercheurs ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa) [26].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] **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.

[2] **THAUVIN & Michel M.**, Guide d'utilisation du béton en site maritime Benoit (centre d'étude techniques maritimes et fluvial) , 1 avril 2008 .

[3] **BENKECHKACHE G.**, « Etude de comportement diffère des bétons autoplaçant Influence des paramètres de composition et de chargement », thèse de magister, Université Mentouri Constantine, 2007.

[4] **CHIBANI N.**, « Formulation et propriétés de béton autoplaçants (BAP) a base de granulats recyclés : Cas des fines de marbre ». Mémoire de magister, université Larbi Ben M'hidi Oum Bouaghi, 2013.

[5] **BENADDAD S., BENATSOU N.** , « Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) ». Mémoire de master, Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.

[6] **OZAWA K., MAEKAWA K., OKAMURA H.**, “Development of high performance concrete”. Journal of the Faculty of Engineering, Vol XLI, N°3, University of Tokyo, Japan, 1992.

[7] **MIURA N., TAKEDA N., CHIKAMATSU R., SOGO S.**, “Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions.” Special Publication, Am. Concr. Inst. USA 140:163–186, 1993.

[8] **UMEHARA H., UEHARA T., ENOMOTO Y. and OKA S.** Development and usage of lightweight high performance concrete, in ACI SP-149 High Performance Concrete (supplementary papers), Ad, 1994

[9] **BRAHIM N.**, « Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçant ». Mémoire de magister. Université de Mohamed Khider –Biskra, 2006.

[10] **HOLCIM .**, « Le béton autocompactant ». Recommandation étudiée par la société Holcim. Suisse, 2004.

- [11] **BAALBAKI M.**, « Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants». Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec 1998.
- [12] **TURCRY PH. et LOUKILI A.**, « Différentes approches pour la formulation des BAP », revue française de génie civil volume 7 n° 4, 2003.
- [13] **AYED K., BENAÏSSA A., ABIDLAH A., LEKLOU N., MOULI .**, “Amélioration des propriétés mécaniques des BAP par traitement mécanique des déchets de carrière de sable siliceux » Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef , 2010.
- [14] **ASSOCIATION FRANÇAIS DE GENIE CIVIL**, « Béton auto-plaçant : Recommandation provisoires», document scientifique et technique, AFGC juillet 2000.
- [15] **LA NORME NF EN 206-9** : règles complémentaires pour le béton auto-plaçant, 2010.
- [16] **BETHMONT S.**, « Mécanisme de ségrégation dans les bétons auto-plaçant », Thèse de doctorat de l'Ecole National des Ponts et Chaussée , paris , 2005.
- [17] **TURCRY P.**, « Retrait et fissuration des bétons auto-plaçant – Influence de la formulation », Thèse de doctorat en Génie Civil, « Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, 2004.
- [18] **BOUHAMOUN N , BELAS N , MESBAH H , MEBROUKI A , YAHIA A .**, «Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplaçant a l'état frais». Afrique Science, 1janvier 2008.
- [19] **HANAA F.**, « Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons auto-plaçant exposés à une température élevée ». Thèse de doctorat en Génie Civil, école Doctorale Sciences et Ingénierie, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [20] **GIBBS JC. and ZHU W.**, « Strength of hardened self-compacting concrete » . Proceedings of First international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Suède, 1999.
- [21] **PETERSSON O.**, « Limestone powder as filler in self-compacting concrete - frost resistance and compressive strength ». Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001.

[22] **KONIG G., HOLSCHEMCHER K., DEHN F., and WEIBE D.** Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour. Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Tokio, Japan, 2001.

[23] **KLUG Y. and HOLSCHEMACHER K.**, « Comparison of the hardened properties of selfcompacting concrete and normal vibrated concrete ». Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland, 2003.

[24] **PINEAUD A.**, « Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplacants et application à l'industrie de la préfabrication. In Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007.

[25] **FERGUENE H.**, « Valorisation des granulats recyclés de déchet des carreaux faïence dans la formulation des bétons auto-plaçant », mémoire de master, université M'hamed Bougara –Boumerdes, 2016.

[26] **HADDAD O.**, « Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge », Thèse de doctorat en Génie Civil, école Doctorale Sciences et Ingénierie, Université de Cergy-Pontoise, 2007.

[Net1] Direction technique et commerciale béton. www.béton-vicats.fr

CHAPITRE II

VALORISATION DES DECHETS

CHAPITRE II

VALORISATION DES DECHETS

II.1. INTRODUCTION :

La question touchant à la gestion des déchets a commencé à se poser de manière préoccupante avec le développement et la gestion de l'environnement urbain. Le volume de déchets s'amplifie de façon préoccupante. Leur caractère hétérogène et leurs effets sur la santé humaine et le développement durable rend plus complexe le choix d'une filière de traitement la mieux adaptée et la plus viable possible.

Aujourd'hui comme les villes des pays en développement en général, celles de l'Algérie font partie des villes où la problématique de la gestion de l'environnement est pertinente. La collecte des ordures ménagères constitue l'une des plus grandes difficultés que rencontrent les autorités publiques. Ces difficultés se traduisent souvent par une accumulation des ordures ménagères, la création de dépôts sauvages et incontrôlés dans les rues.

II.2. DEFINITION :

Un déchet est défini comme " Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui sont 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 ou des odeurs. D'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement [1].

Définit le déchet des points de vues économique et juridique comme suit :

- **Du point de vue économique** : un déchet est tout objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur. Pour s'en débarrasser, il paye un service ou s'en charge lui-même,

- **Du point de vue juridique** : la définition du déchet permet de distinguer une conception subjective et une conception objective. Selon la conception subjective, une propriété devient un déchet lorsque le détenteur a la volonté de s'en débarrasser. Elle lui appartient aussi longtemps qu'elle demeure dans son espace privé. Cette propriété appartient à la municipalité lorsqu'elle est déposée sur la voie publique car, en effet, par cet acte, le détenteur manifeste clairement sa volonté de l'abandonner. Selon la conception objective, un déchet est tout objet dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de sa valeur économique.

Une autre question vient immédiatement à l'esprit : « que fait-on des déchets? ». Car le problème se situe bien à ce niveau et se pose de façon d'autant plus aiguë que la quantité des déchets augmente continuellement.

Les pays à fort niveau de consommation ou de production ont été les premiers à se trouver confrontés au problème, car l'accumulation des déchets occasionnait des nuisances insupportables : pollutions diverses et problèmes de santé publique [2].

II.3. LES DIFFERENTS TYPES DE DECHETS :

II.3.1. Déchets ultimes :

La loi du 13 juillet 1992 a introduit la notion de déchets ultimes et en donne la définition suivante : « un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. »

A terme, seuls les déchets qui n'ont pu être ni recyclés, ni incinérés avec récupération d'énergie, pourront être mis en décharges.

Les déchets ultimes issus des usines d'incinération d'ordures ménagères et déchets assimilés, dénommés mâchefers, peuvent être transformés après traitement en granulats et utilisés pour réaliser les fondations de route [2].

II.3.2. Déchets ménagers et assimilés

Ce terme regroupe l'ensemble des déchets produits dans le cadre de notre vie quotidienne : emballages, restes de repas, électroménagers, vieux meubles, déchets verts, vieux vêtements, etc. [3].

II.3.3. Déchets inertes

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décompose pas, ne brûle 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 [4].



Figure II.1. Déchets inertes.

II.3.4. Déchets dangereux

a) 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....

b) 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].

c) 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 des services 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 [3].

II.3.5. 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.

Les déchets non dangereux et non inertes, dits industriels banals sont de même nature que les ordures ménagères. Ce sont :

- Les bois non traités ou traités avec des produits non dangereux (emballages, coffrages, menuiseries, planchers...),
- Les plastiques en PVC, polystyrène, polypropylène (canalisations, menuiseries, revêtements de sols, emballages...),
- Les métaux ferreux et non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, l'acier, le zinc (toitures, matériels électriques, canalisations, équipements...),
- Les revêtements muraux et de sol textiles,
- Le polystyrène expansé, le polyuréthane,
- Les produits mélangés issus de chantier de réhabilitation...

- Les peintures, vernis, colles, mastics, qui ne comprennent ni solvants organiques, ni substances dangereuses. [5]

II.3.6. 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. [6]

II.4. GESTION DES DECHETS :

II.4.1. Définition

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine ou l'environnement. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tout les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant.

La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité. [7]

II.4.2. 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) :

- 1 -  Réduire
- 2 -  Réutiliser
- 3 -  Recycler

La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changée d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : utiliser au maximum les matériaux et générer le minimum de rebuts. Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un «quatrième R» : «Repenser», qui implique que le système actuel présente des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets. Certaines solutions "repensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile : afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de «prévention de la pollution» indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source. Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. A titre d'exemple, plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains. L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets.

II.4.3. Méthodes de gestion des déchets

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. Certes pour assurer une bonne gestion des déchets, il faut mettre des moyens sur le plan financier que matériel, par conséquent, la bonne gestion

limitera les dégâts sanitaires. C'est ainsi que nous allons examiner successivement les différents modes de gestion des déchets. Ces méthodes sont actuellement au nombre de cinq.

II.4.3.1 L'enfouissement

L'enfouissement est une méthode d'évacuation des déchets organiques qui consiste à creuser une fosse profonde de 0,5 à 1m pour y verser des déchets, asperger de l'essence et la couvrir d'une couche de terre afin de brûler sans fumée les déchets. Ce procédé utilise comme produits désinfectants ou désodorisants le chlore, la chaux, le mazout, et l'essence. Cette méthode reste très appropriée dans des formations sanitaires.



Figure II.2. Enfouissement des déchets.

II.4.3.2. L'incinération

C'est un procédé urbain d'élimination finale des déchets qui consiste à brûler au moyen d'un feu les déchets produits par les hôpitaux. Les procédés de l'incinération comprennent le ramassage des déchets et ordures, le triage pour dissocier les déchets combustible et non combustible. Elle peut être considérée comme un procédé par l'excellence de traitement des immondices, c'est une méthode satisfaisante qui présente cependant quelques inconvénients, parmi lesquels on peut citer :

- Elle nécessite une évacuation des cendres après son exécution,
- Elle provoque un danger de pollution de l'environnement par sa fumée,
- Elle nécessite un investissement et un coût d'exploitation élevés pour sa construction



Figure II.3. Incinération en plein air et usine d'incinération.

II.4.3.3. La décharge contrôlée

La décharge contrôlée est un dépotoir public prévu à l'avance pour l'évacuation des immondices ménagères. Elle a l'avantage d'offrir des éléments pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Cette méthode n'est pas conseillée pour le traitement des déchets hospitaliers.



Figure II.4. Photo d'une décharge contrôlée.

II.4.3.4. Le compostage

Le compostage est un procédé de décomposition des matières organiques usée de manière à le récupérer sous une autre forme permettant une utilisation ultérieure comme engrais. Il nécessite la préparation suivantes : réception des ordures, triage des ordures, préparation des compostes, décomposition, présentation du produit fini.



Figure II.5. Compostage de déchets organiques.

II.4.3.5. Le recyclage

Etant donné que tout ce qui est brûlé est irrémédiablement perdu en tant que matière première, c'est ainsi que le recyclage, qui a pour avantage de réduire la consommation en matière première pour la fabrication de nouveau bien, permet de minimiser l'impact environnemental des déchets. Afin que les déchets recyclables puissent être effectivement recyclés, il est nécessaire qu'un pré-tri soit effectué en amont. Cette opération a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En effet, ceci pourrait les rendre impropres au recyclage. D'autre part, il permet d'orienter les différents déchets vers la bonne destination.



Figure II.6. Usine de recyclage des déchets.

II.5. différents déchets utilisés dans l'élaboration des bétons et des mortiers

II.5.1. Les Laitiers sidérurgiques

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant[8]. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.



Figure II.7. Photo d'un laitier de haut fourneau.

II.5.2. Laitier d'acier

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bi calcique, il est utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison des problèmes de stabilité dimensionnelle. Des procédés de vieillissement se sont développés afin de maîtriser cette instabilité et des initiatives de

valorisation, notamment en génie civil. Aussi, les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus.

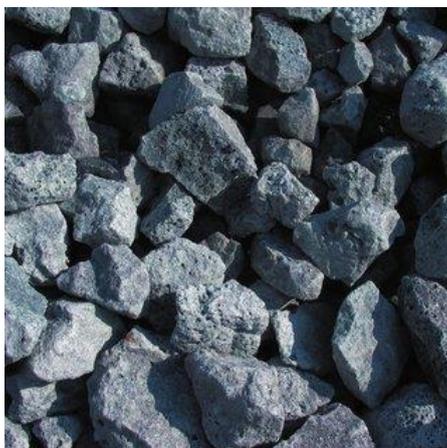


Figure II.8. Photo d'un laitier d'acier.

II.5.3. Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussées dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granulats légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classées selon leurs teneurs en CaO et du type de charbon brûlé.



Figure II.9. Photo de la cendre volante.

II.5.4. 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.



Figure II.10. Déchets de verres.

II.5.5. Pneus usagés

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la

fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, 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 dû au retrait.

En effet, les pneumatiques usagés constituent un gisement de matières premières secondaires, leur récupération et leur valorisation constituent pour notre pays un impératif économique. La valorisation de ce déchet industriel est à ses premiers balbutiements. Un premier chantier expérimental a été initié par le département ministériel, concernant l'utilisation des pneus réformés en tant que soutènement d'un talus de remblai dans un projet routier (contournement de Bousmail). Les travaux déjà finalisés ont permis de mettre en œuvre 3500 pneus mis à disposition par Michelin Algérie [9].



Figure II.11. Déchets de pneus usagés.

II.5.6. Ciment durci

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.



Figure II.12. Ciment durci.

II.5.7. Déchets de démolition

Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres (principalement les séismes) fournissent chaque année des millions de tonnes de débris de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature :

- 1) les bétons armés sans enduit ni plâtre,
- 2) les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- 3) les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- 4) les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%,
- 5) les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.



Figure II.13. Déchets de démolition

II.5.8. Déchets de production de l'industrie du béton

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- 1) Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production ; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton); il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.
- 2) Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme ; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture.



Figure II.14. Industrie du béton.

II.5.9. Déchets de briques

Les déchets de briques sont issus de l'industrie des produits rouges. Ces produits comptent parmi les plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle. Il existe deux types de briques: briques en terre crue et briques en terre cuite.

- **Briques en terre crue**

Les briques en terre crue (figure 2.15) constituent un matériau de base pour la construction de murs et de voûtes. En principe, les briques sont, fabriquées à base de terre (environ 75%), de paille (environ 20%) et d'eau (environ 5%). Le mélange est coulé dans des moules en bois, pour obtenir des briques de (40.20.10) cm³. Les briques sont séchées à l'air pendant plusieurs jours, avant d'être utilisées [10].



Figure II.15. Briques en terre crue [10].

▪ Briques en terre cuite

Les briques en terre cuite (figure I.16) se composent d'argile, d'adjuvants naturels (sable, sciure de bois) et d'eau. Les composants sont broyés jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. L'argile est façonnée puis séchée et cuite à une température d'environ 1000°C, pour devenir ce que l'on appelle des briques en terre cuite [10].



Figure II.16. Briques en terre cuite [10].

L'industrie des produits génère des quantités considérables de déchets. Selon les statistiques disponibles, la quantité de rebus dans cette industrie représente environ 10% de la production globale.

II.5.10. Sables de fonderies

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage des pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (résines phénoliques). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables

de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. La réglementation française, en l'occurrence l'Arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de la réutilisation de ces sables: «les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5mg/kg de sable rapporté à la matière sèche».



Figure II.17. Sable de fonderies.

II.5.11. Déchets 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. Les déchets plastiques peuvent incorporés dans des matrices cimentaires. En effet, des études antérieures ont montrées qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons comme liant pour la production d'un matériau composite à haute performance ou sont ajoutés dans le béton (sous forme de grains et fibres ondulées et rectilignes [11]).

Il existe plusieurs types de déchets plastiques :

- Les déchets plastiques industriels : il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production de 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 grand 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.



Figure II.18. Déchet plastiques.

II.5.12. Déchets de marbre

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris pouvant présenter des veines ou des fossiles. Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides de plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangé à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,27. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleus, roses, gris jaunes, rouges, verts, violettes ou noires.

La production de marbre en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal, et la Grande Bretagne. Les produits marbrières Algériennes sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : italiennes et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation des produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçages avec des pierres ponces.

Le marbre Algérien est exploité actuellement par l'entreprise nationale du marbre 'Enamarbre' qui dispose de dix unités de production implantées dans cinq Wilayas [10].

La production de marbre en blocs (2018), par les filiales de l'entreprise Enamarbre est de 200.000m².



Figure II.19. Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.

II.5.13. Boues rouges

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite. Elles sont stockées soit au fond des océans (Exemples : Allemagne et France), soit près des usines comme au Canada. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.



Figure II.20. Boues rouges.

Références bibliographiques :

- [1] **KHEMISSI R.**, « Caractérisation et choix d'une filière de traitement des déchets ménagers et assimilés de la ville d'Oran » thèse de Magister Université d'Oran, 2014.
- [2] **Mehdi C .**, «Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment» thèse de fin de formation 2007.
- [3] **STAMBOULI M .**, « Valorisation de débris de verre dans les infrastructures routières : Application au verre industriel, verre ménager et verre mixte », Mémoire de master recherche , 2016 .
- [4] **CHELABI H , TALEB Z .**, « Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre ». Mémoire de master , université de bouira 2017
- [5] **MAEL A , XAVIER GH , CHRISTIAN M , DORIS N .**, « Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets » , Collection « RéférenceS » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) , Mai 2012 .
- [6] **EL HAFIANE S .**, Gestion des déchets solides au niveau de la Commune Urbaine d'Agadir et leur impact sur le milieu naturel , mémoire de fin d'étude , Marrakech , mars 2012
- [7] **BOURMATTE N .**, « Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques » , thèse de doctorat , université des Frères Mentouri constantine , Mars 2017 .
- [8] **RAMACHANDRAN V-S .**, utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.
- [9] **BONNET S, TURATSINZE A et GRANJU J-L.**, effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment, Annales du bâtiment et des travaux publics, décembre 2004-N° 6
- [10] **NIGRI G .**, « Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique », thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- [11] **BELKBIR H .**, « Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique », mémoire de DEUA, Université de Boumerdes, 2011.

CHAPITRE III

ETUDE DES BAP A BASE DES FINES RECYCLEES

CHAPITRE III

ETUDE DES BAP A BASE DES FINES RECYCLEES

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre on va étudier l'influence de l'utilisation des déchets comme ajout au ciment dans la formulation des bétons auto-plaçant. Les résultats sont tirés des études pratiques réalisées en Algérie sur différents déchets.

Pour cela, on a choisi de la littérature trois études réalisées sur des déchets de finesse et de nature différentes, disponibles en Algérie. Ces trois études sont citées dans la liste des références.

Les déchets comparés sont :

- **Filler calcaire**

Les fillers calcaires (FC) utilisés sont composés essentiellement de calcite (> 70 %). Ces fillers sont finement broyés obtenus après le tamisage du sable concassé à travers un tamis de 80 μ m (figure III.1) [1].



Figure III.1. Filler calcaire [1].

- **Laitier de haut fourneau**

Le laitier utilisé est un laitier cristallisé de l'usine El Hadjar à une couleur grise. Il est utilisé sous forme d'une poudre finement broyée obtenue par un concassage à l'aide d'un concasseur

à mâchoires, suivit d'un broyage dans un broyeur à boulets afin d'obtenir une finesse inférieure à $80\mu\text{m}$ (figure III.2) [1].



Figure III.2. Laitier [1].

- **Brique**

La poudre de brique est obtenue par concassage et broyage de gravats de maçonnerie en brique d'argile [2].

- **Verre**

La poudre de verre est issue de la récupération des bouteilles en verre dans des décharges sauvages et dispersées dans la nature (montagne, bord de mer etc.). La poudre de verre est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de même couleur (verte). Celles-ci sont nettoyées, concassées et finement broyées (Figure III.3) [3].



Figure III.3. Poudre de verre [3].

Les caractéristiques de ces déchets sont comparées par apport aux caractéristiques du ciment utilisé pour la formulation des bétons auto-plaçant.

▪ Ciment utilisé

Le ciment utilisé pour la formulation du BAP de référence est de type CEM II/A de classe 42.5, c'est un ciment portland composé, résultant d'un broyage simultané de clinker (70 à 80 %), de laitier granulé (15 à 25 %) et de gypse (5 %), conforme à la norme algérienne NA 442 (NA 442, 05) et provenant de la cimenterie de Hdjar Essoud [1].

III.2. CARACTERISTIQUES DES DECHETS UTILISE :

III.2.1. Les caractéristiques physiques

a- La masse volumique absolue :

Les valeurs des masses volumiques absolues pour le ciment et les différents déchets étudiés sont présentées dans le tableau III.1 et la figure III.4 :

Tableau III.1. Valeurs des masses volumiques absolues des déchets utilisés

	Ciment	Filler calcaire	Laitier de haut fourneau	Brique	Verre
Masse volumique absolue (kg/m³)	3060	2740	3030	2670	2270

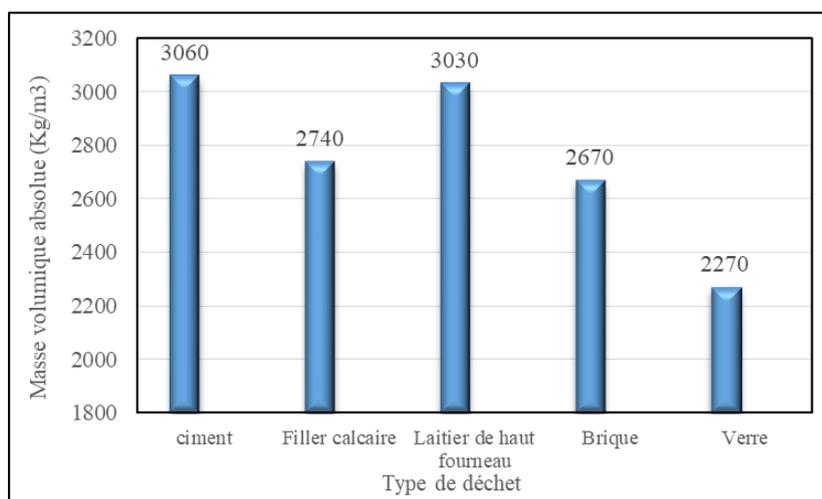


Figure III.4. Valeurs de la masse volumique absolue du ciment et des déchets étudiés.

Commentaire

D'après la figure III.4, on remarque que la masse volumique des quatre déchets est inférieure à celle du ciment, et que le déchet de verre présente le déchet le plus léger par rapport aux autres déchets.

b- La masse volumique apparente :

Les valeurs des masses volumiques apparentes pour les différents déchets étudiés sont présentées dans le tableau III.2 et la figure III.5 :

Tableau III.2. Valeurs des masses volumiques apparentes des déchets utilisés.

	Ciment	Filler calcaire	Laitier de haut fourneau	Brique	Verre
Masse volumique apparente (kg/m³)	1013	858	1224	815	795

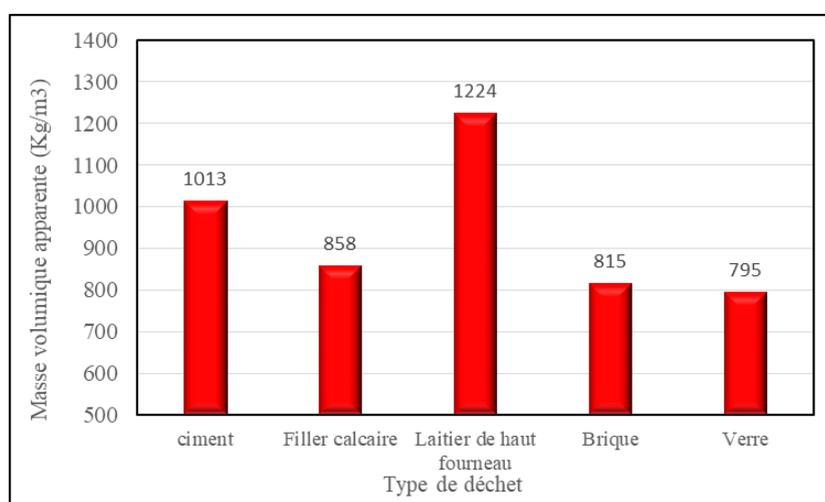


Figure III.5. Valeurs de la masse volumique apparente du ciment et des déchets étudiés.

Commentaire

D’après la figure III.5, on remarque que le déchet de laitier de haut fourneau donne une masse volumique apparente plus grande que celle du ciment, et que le déchet de verre présente toujours le déchet le plus léger par rapport aux autres déchets.

c- La surface spécifique Blaine :

Tableau III.3. Valeurs des surfaces spécifiques Blaine des déchets utilisés.

	Ciment	Filler calcaire	Laitier de haut fourneau	Brique	Verre
SSB (cm²/g)	3726	9918	6016	12197	5661

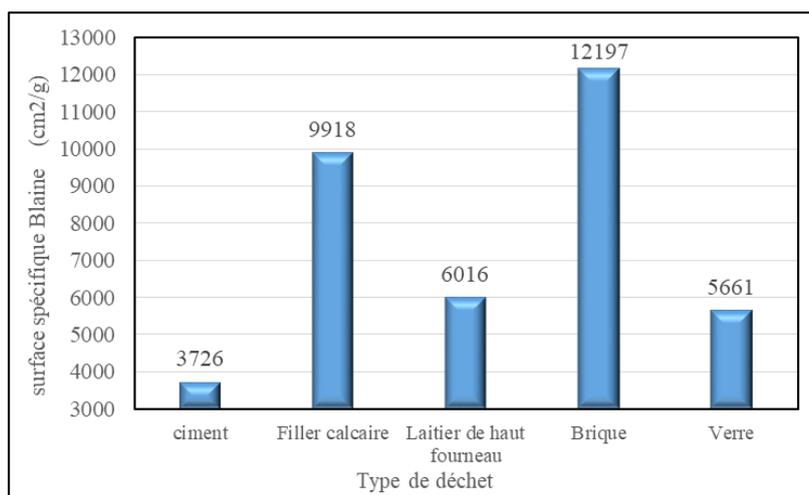


Figure III.6. Valeurs de la surface spécifique Blaine du ciment et les différents déchets étudiés.

Commentaire

D'après la figure III.6, on remarque que pour les quatre déchets, la surface spécifique Blaine est supérieure à celle du ciment, et que le déchet de verre présente le déchet du SSB la plus petite par rapport aux autres déchets.

III.2.2. Les caractéristiques chimiques

a. Filler calcaire

Les valeurs portées sur le tableau III.4, relatives à la composition chimique de filler calcaire, indique des teneurs importantes de chaux.

Tableau III.4. Composition chimique du filler calcaire

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O	MgO	Na ₂ O	Cl	SO ₃	PAF	K ₂ O
En %	55.51	0.11	0.50	0.06	0.20	0.08	0.027	0.06	42.5	0.01

b. Laitier

Le tableau III.5 présente la composition chimique de laitier.

Tableau III.5. Composition chimique du laitier.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
En %	38.55	8.45	35.73	3.20	5.21	0.36	0.95	0.34

c. Brique

Le tableau III.6 présente la composition chimique de la poudre de brique .

Tableau III.6. Composition chimique de la poudre de brique.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
En %	2.59	15.68	74.34	6.87	2.01	0.57	2.83	0.10

d. Verre

Le tableau III.7 présente la composition chimique de la poudre de verre.

Tableau III.7. Composition chimique de la poudre de verre.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	MnO	S	PAF
En %	16.12	1.32	70.25	4.08	1.60	2.32	0.65	-	0.20

e. Ciment

Le tableau III.8 présente la composition chimique de la poudre de verre.

Tableau III.8. Composition chimique du ciment.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	CaO, libre
En %	60.24	5..69	23.25	3.36	0.74	0.27	0.45	1.94	1.67	0.98

Commentaire

Selon les analyses chimiques des fines recyclées (Tableau III.4,5,6,7), le filler calcaire a la teneur la plus élevée en oxyde de calcium et la plus faible en aluminium, silice, ferrite, magnésium et sodium par rapport à la poudre de verre, la poudre de brique et au laitier. Par contre, la teneur en oxyde de silice de poudre de brique est la plus élevée par rapport aux autres fines.

III.3. FORMULATION DU BAP :

Pour notre étude, et pour les formulations des BAP, on a choisi une composition de référence (sans addition) BAPR [1], et des compositions avec les quatre additions (filler calcaire, laitier, brique et le verre) avec trois différents dosages de chaque addition (30, 45 et 60%) par rapport à la masse du ciment. Le tableau regroupe les différentes compositions des BAP [1], [2] et [3]:

Tableau III.9. Les différentes formulations des BAP étudiées.

	BAPR			BAPFC			BAPLC			BAPFV			BAPFB		
	0%	30 %	45 %	60 %	30 %	45 %	60 %	30 %	45 %	60 %	30 %	45 %	60 %		
Addition (Kg/m³)	-	105	157	210	105	157	210	105	157	210	105	157	210		
Ciment (Kg/m³)	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350		
Eau (L/m³)	175	175	175	175	175	175	175	200	200	200	196	196	196		
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56		
E/L	0.5	-	-	-	-	-	-	0.43	0.39	0.35	0.43	0.39	0.35		
S 0/1.25 (Kg/m³)	418	394	383	371	397	386	376	-	-	-	373	462	452		
S 0/4 (Kg/m³)	449	424	412	399	426	415	404	-	-	-	391	383	375		
S 0/0.5 (Kg/m³)	-	-	-	-	-	-	-	471	460	448	-	-	-		
S 0.5/5 (Kg/m³)	-	-	-	-	-	-	-	237	231	225	-	-	-		
G3/8 (Kg/m³)	171	162	157	152	163	158	154	396	387	377	248	243	238		
G5/15 (Kg/m³)	686	647	628	609	651	634	616	475	463	451	475	465	455		
G/S	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1.23	1.23	1.23	0.84	0.84	0.84		
SP (Kg/m³)	7	7	7	7	7	7	7	6.3	6.3	6.3	7.7	7.7	7.7		
Volume de pate (L/m³)	295	333	352	371	330	347	364	402	369	392	359	379	398		

Avec :

BAPR : béton auto-plaçant sans addition.

BAPF : béton auto-plaçant avec l'ajout de filler calcaire.

BAPL : béton auto-plaçant avec l'ajout de laitier.

BAPB : béton auto-plaçant avec l'ajout de poudre de brique.

BAPV : béton auto-plaçant avec l'ajout de poudre de verre.

III.4. LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS :

III.4.1. Etalement au cône d'Abrams

Le tableau III.10 et la figure III.7 regroupent les différentes valeurs de l'essai d'étalement au cône d'Abrams pour les différentes formulations des bétons auto-plaçant étudiées.

Tableau III.10. Valeurs d'étalement pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Etalement (cm) pour les différents pourcentages étudiés		
	30%	45%	60%
BAPR		68	
BAPF	71	68	67
BAPL	66.5	60	55.9
BAPB	71	68	67
BAPV	69	68.2	68

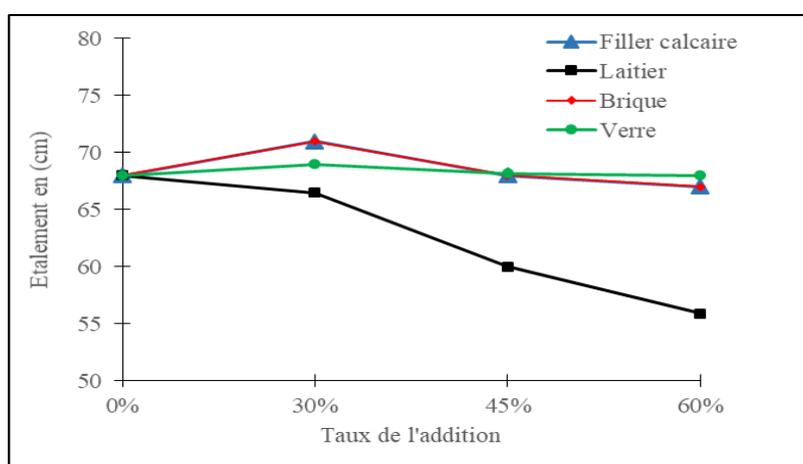


Figure III.7. Influence du dosage en addition sur l'étalement.

Commentaire

D'après les résultats des essais d'étalement, présentés dans la figure III.7, on remarque que tous les valeurs de l'étalement obtenues par tous les BAP sont entre 55.9 et 71cm, donc la condition du cahier des charges a été correctement satisfaite par les divers bétons (Selon la norme (NF EN 206 – 9), l'étalement d'un béton auto-plaçant peut varier entre (550 et 850 mm)).

La deuxième remarque à faire, est que par rapport au béton de référence BAPR, l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en addition. Cette tendance est surtout valable pour le déchet laitier. Pour les autres ajouts, on remarque une légère augmentation de l'étalement pour un dosage de 30%. Au-delà, l'étalement commence à diminué.

III.4.2. Temps T_{500}

Grâce à l'essai au cône d'Abrams, on mesure deux paramètres : l'étalement et le T_{500} , ce dernier indique le temps que met la galette de béton pour atteindre un étalement de 500 mm.

Le tableau III.11 et la figure III.8 regroupent les différentes valeurs du temps T_{500} pour les différentes formulations des bétons auto-plaçant étudiées.

Tableau III.11. Valeurs du temps T_{500} pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Le temps T_{500} (s) pour les différents pourcentages étudiés		
	30%	45%	60%
BAPR		0.9	
BAPF	1.2	1.4	1.6
BAPL	1.5	2.3	3
BAPB	3.1	4.2	11.1
BAPV	0.9	1.3	1.45

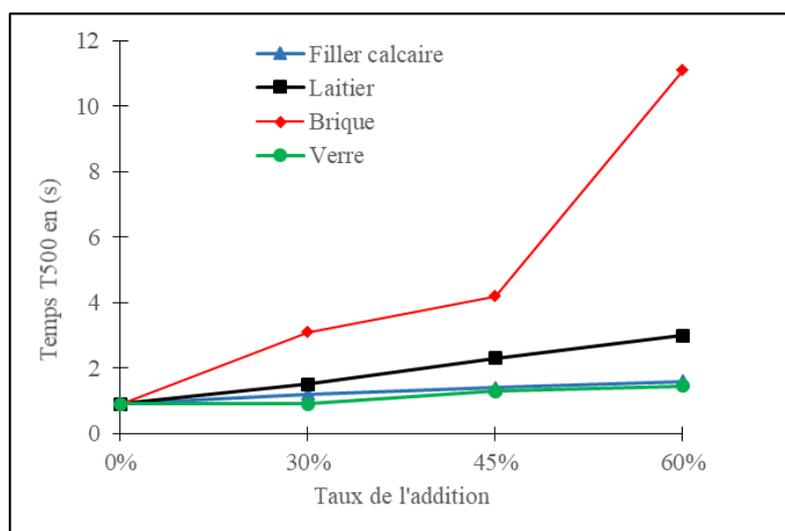


Figure III.8. Influence du dosage en addition sur le temps T_{500} .

Commentaire

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 500 mm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. D'après les résultats présentés dans la figure III.8, on remarque que tous les BAP avec déchet présentent des viscosités importantes, on note des T_{500} supérieures aux T_{500} du BAPR.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage des additions entraîne une augmentation du temps d'écoulement, surtout pour les BAP avec 45% et 60% d'ajout de laitier et de brique ($T_{500} > 2s$).

Les bétons BAPR, BAPF et BAPV présentent des valeurs de T_{500} inférieures à 2s.

III.4.3. Taux de remplissage dans la boîte en L

Le tableau III.12 et la figure III.9 regroupent les différentes valeurs de l'essai de la boîte en L pour les différentes formulations des bétons auto-plaçant étudiées.

Tableau III.12. Valeurs des taux de remplissage pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Taux de remplissage pour les différents pourcentages étudiés		
	30%	45%	60%
BAPR		0.78	
BAPF	0.92	0.86	0.845
BAPL	0.845	0.805	0.73
BAPB	0.82	0.79	0.73
BAPV	0.90	0.85	0.81

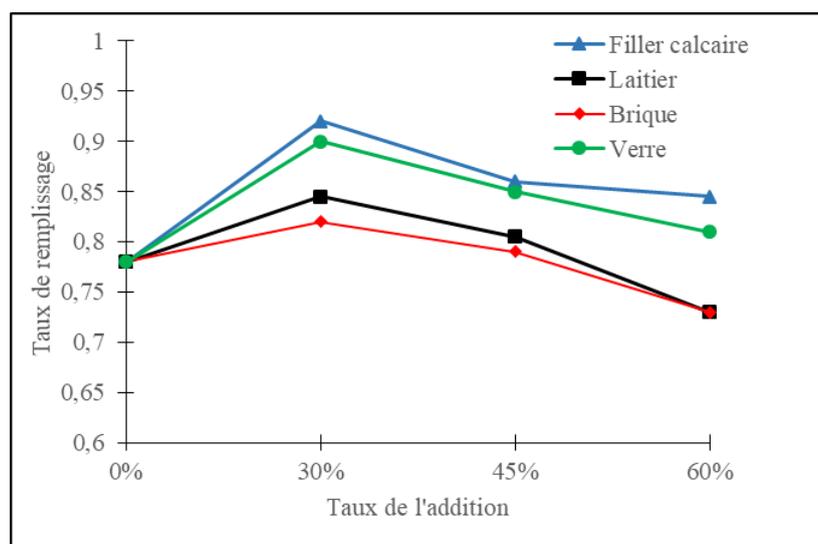


Figure III.9. Influence du dosage en addition sur le taux de remplissage dans laboite en L.

Commentaire

D'après la figure III.9 on remarque que la plupart des BAP donne des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des bétons auto-plaçant ($H_2/H_1 \geq 0,8$) selon la norme (NF EN 206-9), excepté le béton auto-plaçant de référence BAPR qui donne une valeur du taux de remplissage de 0,78.

Le BAPL avec un dosage de 60% d'addition, donne une valeur critique du taux de remplissage de 0,73, la même remarque pour le BAPB avec une valeur de taux de remplissage de 0,73.

Le dosage optimal donnant le meilleur taux de remplissage est 30% pour toutes les additions, au-delà de ce dosage, on relève une diminution du taux de remplissage des BAP,

Le BAPF donne les meilleurs taux de remplissage pour tous les dosages par rapport aux autres bétons auto-plaçant.

III.4.4. Stabilité au tamis

Le tableau III.13 et la figure III.10 regroupent les différentes valeurs de l'essai de stabilité au tamis pour les différentes formulations des bétons auto-plaçant étudiées.

Tableau III.13. Valeurs de l'essai de stabilité pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Résistance à la ségrégation en (%)		
	30%	45%	60%
BAPR		10.46	
BAPF	9.2	8.1	8
BAPL	7.7	6.1	2.7
BAPB	10	8	7
BAPV	12	9.5	8.1

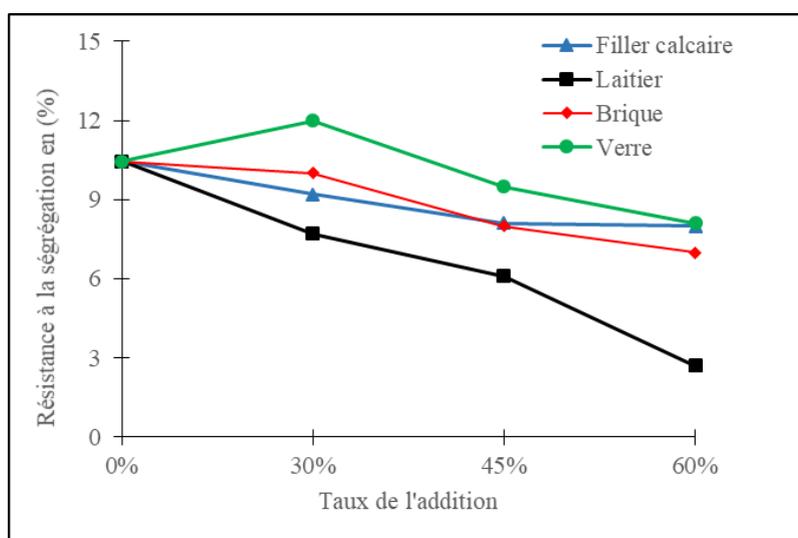


Figure III.10. Influence du dosage en addition sur la résistance à la ségrégation.

Commentaire

Les résultats présentés sur la figure III.10 montrent que le BAPR se caractérise par une stabilité largement inférieure aux valeurs limites préconisées (< 20% ou <15%) par la norme (NF EN 206 – 9).

Dans le cas général, les additions réduisent la quantité de laitance, ce qui se traduit par une meilleure stabilité (moins de ressuage et meilleure résistance à la ségrégation) [1]. Cette amélioration de la stabilité dépend du dosage et du type de l'addition. En effet au-delà de 45% de BAPL la quantité de laitance diminue au-dessous de 5% ; la stabilité du BAP devient critique, car la viscosité du mortier évolue vers des valeurs importantes qui empêchent le BAP de s'écouler et de remplir les coffrages correctement, on observera alors une mauvaise qualité de parement [1].

III.5. LES ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT DURCIS

III.5.1. Résistance à la compression

Dans cette partie, on a étudié l'influence des quatre additions de différente nature sur la résistance à la compression des BAP, pour cela, trois dosages différents ont été utilisés (30, 45 et 60% par rapport au poids du ciment) et ceci pour des durées de cure de 2, 7 et 28 jours.

a. La résistance à la compression à 2 jours

Les valeurs des résistances mécaniques obtenues à 2 jours pour les différentes formules de bétons auto-plaçant étudiées sont données dans le tableau III.14 et présentées sur la figure III.11.

Tableau III.14. Valeurs de la résistance a la compression à 2 jours pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Résistance à la compression en (MPa)		
	30%	45%	60%
BAPR		9.5	
BAPF	12	11	10.5
BAPL	9	8	7.8
BAPB	13	14.2	15
BAPV	11	12	12

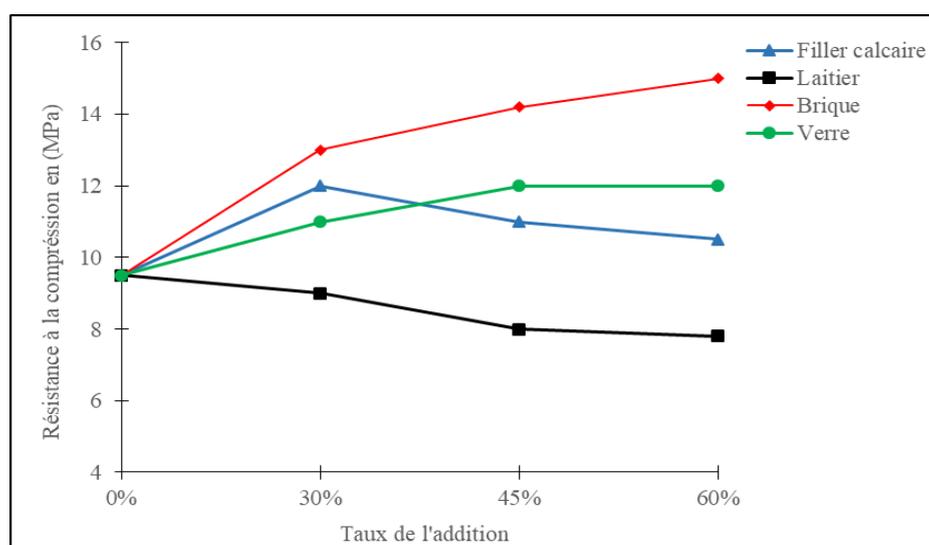


Figure III.11. Influence du dosage des additions sur la resistance ala compression à 2 jours.

Commentaire

D'après la figure III.11, on remarque qu'à l'âge de 2 jours de durcissement, le BAPB présente des résistances à la compression plus élevées par rapport aux BAP R (9,5 MPa). La résistance augmente avec l'augmentation du dosage de l'addition (elle passe de 13 MPa pour un dosage de 30% à 15 MPa pour un dosage 60%). On fait la même remarque pour le béton auto-plaçant de verre, la résistance augmente avec l'augmentation du dosage de la poudre de verre (la résistance passe de 11 MPa pour un dosage de 30% à 12 MPa pour un dosage 60%).

La poudre de laitier a donnée les résistances les plus faible par rapport aux autres bétons auto-plaçant, et la résistance diminue avec l'augmentation du dosage.

b. La résistance à la compression à 7 jours

Les valeurs des résistances mécaniques obtenues à 7 jours pour les différentes formules de bétons auto-plaçant étudiées sont données dans le tableau III.15 et présentées sur la figure III.12.

Tableau III.15. Valeurs de la résistance a la compression à 7 jours pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Résistance à la compression en (MPa)		
	30%	45%	60%
BAPR		21	
BAPF	26	24	23
BAPL	24.5	23.5	24
BAPB	27	24.8	24
BAPV	29	30.2	29.1

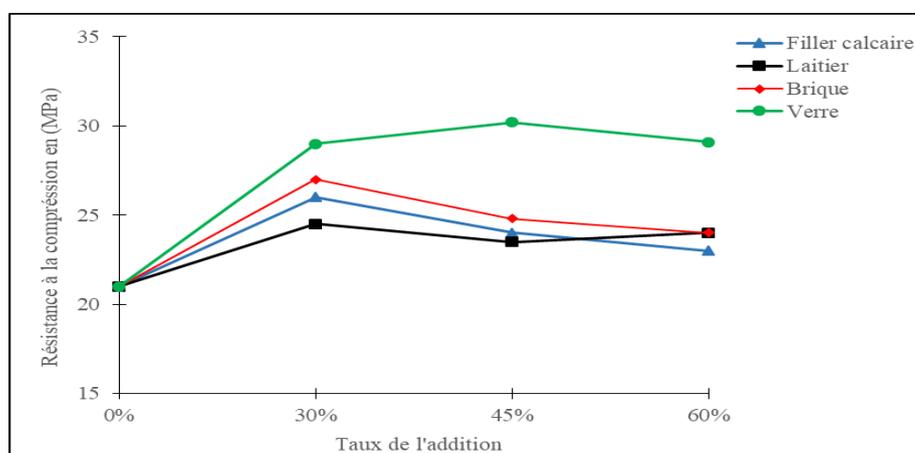


Figure III.12. Influence du dosage des additions sur la résistance ala compression à 7 jours.

Commentaire

D'après la figure III.12, on remarque que les bétons auto-plaçant avec addition ont des résistances à 7 jours supérieures à celle du béton auto-plaçant de référence, et que ces résistances diminuent avec l'augmentation du dosage de l'addition.

L'ajout de 30% d'addition a donné la résistance la plus élevée par rapport aux dosages 45% et 60%, et ça pour la plus part des additions.

La poudre de verre a donné les résistances les plus élevées par rapport aux autres additions.

c. La résistance à la compression à 28 jours

Les valeurs des résistances mécaniques obtenues à 28 jours pour les différentes formules de bétons auto-plaçant étudiées sont données dans le tableau III.16 et présentées sur la figure III.13.

Tableau III.16. Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours pour les différentes compositions des BAP étudiées.

Déchets	Résistance à la compression en (MPa)		
	30%	45%	60%
BAPR		29	
BAPF	36.5	35	33
BAPL	39	40	37
BAPB	43	47.5	44.5
BAPV	38	38.2	38

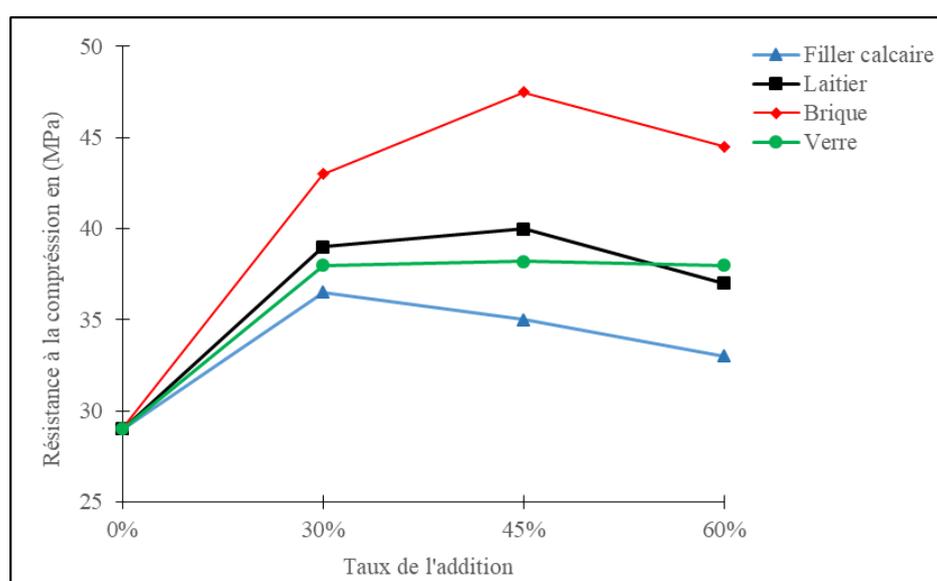


Figure III.13. Influence du dosage des additions sur la résistance à la compression à 28 jours.

Commentaire

D'après la figure III.13, on remarque que les bétons auto-plaçant avec addition ont des résistances à 28 jours supérieures à celle du béton auto-plaçant de référence.

Dans le cas général, l'ajout de 45% d'addition a donné la résistance la plus élevée par rapport aux dosages 30% et 60%.

L'ajout de la poudre de verre a donné les résistances les plus élevées par rapport aux autres additions, alors que l'ajout du filler calcaire a donné les résistances les plus faibles .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] **LAIFA W.**, « Contribution à l'étude des effets du laitier cristallisé et des fibres de diss sur les propriétés des bétons autoplaçants », thèse de doctorat, université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.

[2] **BHIM M., MERABET W., BOUCETTE T.A.**, « Effets des dechets de démolition en brique sur les propriétés autoplaçants des bétons », ALGERIE EQUIPEMENT n° 50, Decembre 2011.

[3] **BHIM M., BOUCETTE T.A.**, « Valorisation du verre à bouteille comme addition fine dans les bétons autoplaçants », Déchets Sciences et Techniques - N°65 - Novembre 2013.

[4] **Norme NF 260-9**, Regles complémentaires pour le béton autoplaçant, 2010.

Conclusions générales

Les bétons auto-plaçant (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux. L'absence de vibration qui caractérise leur mise en place permet en effet de réduire les coûts globaux de production, de construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferrillés et également de réduire les nuisances sonores et la pénibilité du travail qu'ils nécessitent.

Le présent travail apporte un éclairage sur la valorisation des fines des déchets de : laitier de haut fourneau, brique et verre comme addition pour la formulation des bétons auto-plaçant.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt de substituer dans les BAP le filler calcaire par : le laitier de haut fourneau, la brique et le verre dans les mêmes proportions de 30%, 45% et 60% par rapport à la masse du ciment, induisant des intérêts techniques et des avantages environnementaux potentiels.

Les remarques tirées de ce travail sont :

- L'ajout de 30% de déchet de brique et de verre, améliore l'étalement au cône d'Abrams
- L'ajout des déchets comme additions augmente le temps d'écoulement T_{500} .
- Le dosage optimal donnant le meilleur taux de remplissage est 30% pour toutes les additions, au-delà, on relève une diminution du taux de remplissage des BAP,
- L'utilisation des déchets de laitier de haut fourneau, de brique et de verre comme addition réduit la quantité de laitance, ce qui se traduit par une meilleure stabilité
- L'incorporation des déchets de laitier de haut fourneau, de brique et de verre comme addition améliore la résistance à la compression. La poudre de brique présente les meilleures résistances à court terme (7jours) et à long terme (28jours).