REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Elaboration D'un Béton Auto-Plaçant Léger

Présenté par
CHAHBA MOUNA Hamza
BELGHAIT Abderrahim
Proposé et Dirigé par
Mm HERIHIRI.O

Promotion (2019/2020)


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

*Nous tenons d'abord à remercier **ALLAH** pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice **HERIHIRI OUIDED** pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance et sa gentillesse qui nous ont permis d'élaborer ce travail.*

Nous tenons aussi à remercier cordialement et sincèrement Nos chers parents et nos chères familles

Nous tenons à remercier : les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Nous remercions également les responsables du Laboratoire de génie civil pour leur aide

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi ; ceux qui m'ont encouragé et soutenu à combattre les aléas de la vie et donner le meilleur de moi, en témoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie essentiellement cette thèse à ***mes parents***.

A ***ma très chère soeur*** *ainsi qu'à* ***mes très chers frères*** *et* ***les épouses de mes frères*** *et* ***mes neveux*** *et toute la famille qui m'ont énormément aidé et à qui je témoigne toute mon affection et ma profonde admiration.*

A mon binôme « ***CHAHBA MOUNA HAMZA*** *» qui je souhaite tout le bonheur et la belle vie.*

A tous mes très chers amis et tous la promotion de génie civil, les collègues de spécialité matériaux en génie civil

A tous ceux que j'aime et qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce modeste travail…

ABDERRAHIM

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que Je dédie ce Travail a ceux qui me témoignent chaque jour que dieu fait un amour inconditionnel que dieu les protège a ***mes chers parents***

À qui Je porte fièrement son nom, A ***mon père*** *qui a sacrifie toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis aujourd'hui*

A qui a veillé sur moi jour et nuit depuis mon enfance, à qui me donne l'amour la gentillesse le respect qui me donne toujours. Courage volonté et force pour réussir c'est la reine de mon cœur à ***ma mère***

A ma trés ***chére sœurs*** *a* ***mes frères (MOUHAMED et SOHAIB)*** *qui je les aime trop a toutes* ***ma famille*** *sans exception.*

A mon binôme ***BELGHAIT ABDERRAHIM*** *pour sa participation vive durant l'élaboration de ce travail et sa famille*

A mes très chers amies ***AYOUB , HOUSSEM, AMINE ,KHIEREDDINE , KAMEL***

A tous mes collègues,

A tout la promotion de G.C 2020

tous mes amis d'étude depuis l'école Primaire Jusqu'à l'université.

HAMZA

ملخص

الخرسانة خفيفة الوزن المرصوصة ذاتيا هي الخرسانة التي تتميز بالمرونة والخفة ، علاوة على أنها قابلة للتشوه ومستقرة للغاية. يمكن إعدادها و صبها بدون اهتزازات مع الحفاظ على تجانسها وبدون فصل حتى في مكوناتها في محيط كثير التسليح , إنها تتطابق تمامًا مع أشكال القوالب الأكثر تعقيدًا .

الهدف من هذا البحث هو تطوير تركيبة من الخرسانة خفيفة الوزن ذاتية الدمج تعتمد على مادة محلية (الفلين) مع الحفاظ على قابلية تشغيل عالية واستقرار جيد للغاية ودراسة سلوكها فيما يتعلق بقدرة الملئ - الفصل ومقارنته بالخرسانة المرصوصة ذاتيا.

من نتائج هذا البحث وجدنا أن الخرسانة خفيفة الوزن المرصوصة ذاتيا القائمة على الفلين لها خصائص وأداء مقبول للغاية. ميزته هي أنه يعتمد على المواد المحلية ، وخفته بالإضافة إلى أنه يتمتع بميزة بيئية لأننا نستخدم الفلين.

Résumé

Un béton autoplaçant léger (BAPL), est un béton qui se caractérise par sa fluidité et sa légèreté, d'ailleur il est très déformable et stable. Il peut se mettre en place sans vibrations tout en restant homogène et sans ségrégation même en milieux fortement ferraillés. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes.

L'objectif de cette recherche est d'élaborer une formulation de béton autoplaçant léger à base d'un matériau local (le Liège) en gardant une ouvrabilité élevée et une très bonne stabilité et étudié son comportement vis-à-vis de la capacité de remplissage - la ségrégation et le comparer à un BAP.

D'après les résultats de ces recherches nous avons constaté que les BAPL à base de liège présentent des caractéristiques et performance très acceptable. Son avantage qu'il soit à base de matériaux locaux, et sa légèreté en plus il présente un avantage écologique vu qu'on utilise le liège.

Abstract

A lightweight self-compacting concrete, is a concrete that is characterized by its fluidity and lightness, It is very deformable and stable it can be installed without vibrations while remaining homogeneous and without segregation even in heavily ferrous environments. It fits perfectly the shapes of the most complex formwork.

The objective of this research is to develop a lightweight, self-compacting concrete formulation based on a local material (the cork) keeping a high handy and very good stability and studied its behaviour in the face of the filling capacity-segregation and comparing it to a self-compacting concrete.

Based on the results of this research we found that lightweight self-compacting concrete cork based have very acceptable characteristics and performance. Its advantage is that it is based on local materials, and its lightness in addition it presents an ecological advantage due to the use of the cork

Sommaire

Dédicaces
Remerciements
ملخص
Abstract
Résumé
Sommaire
Liste des tableaux
Liste des figures
INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : béton autoplaçant

I-1 Introduction…… 1
I-2 Historique…… 2
Définition.....3
Composantes du BAP.....4
I-4.1 Ciment.....6
I-4.2 Les granulats.....6
I-4.3 Les ajouts.....7
I-4.4 Les adjuvants.....9
I-4.5 l'eau…… 12
I-5 Formulation du BAP…… 13
I-5.1 Méthodes de conceptions du BAP.....14
I-5.2 Contrôle de qualité du BAP …… 17
I-5.3.1 à l'état frais…… 17
I-5.3.2 à l'état Durci …… 21
Propriétés du BAP.....23
I-6.1 Propriétés physiques…… 23
I-6.2 Propriétés mécaniques.....24
I-6.3 Propriétés de durabilité…… 28
Utilisation du BAP.....33
Exemples des ouvrages construits en BAP.....34
Avantages et inconvénients.....36
I- Conclusion.....37

Chapite 2 : béton autoplaçant léger

II-1 Introduction…… 38
Historique.....38
Définition.....39
Granulats légers pour bétons de structure.....40
II-4.1 la fabrication des granulats légers.....40
II-4.1.1 Granulats légers naturels.....40
II-4.1.2 Granulats légers artificiels…… 41
II-4.2 Différents types de granulats légers…… 42
II-5 Formulation du BAPL…… 43
II-5.1 Méthodes de conceptions du BAPL…… 43

II-5.2 Contrôle de qualité du BAPL…… 44
II-5.2.1 à l'état frais…… 44
II-5.3.2 à l'état durci …… 47
Propriétés du BAPL.....49
II-6.1 Propriétés mécaniques…… 49
II-6.2 Propriétés de durabilité.....54
Conductivité thermique 56
Utilisation du BAPL 57
II-8.1 Bâtiment 57
II-8.2 Génie-civil 58
Avantages et inconvénients…… 60
II- Conclusion.....61

Chapitre 3 : Matériaux et essais

III -1 Inroduction …….. 62
III -2 Matériaux utilisées……... 62
III -2.1 Le ciment.....62
III -2.2 Liége expansé…… 65
III -2.3 Sable.....68
III -2.4 Gravier ……..… 69
III -2.5 Adjuvant… 72
III -2.6 L'eau de gâchage.....72
III -3 Formulation……. 73
III -3.1 Formulation béton autoplaçant témoin …… 73
III -3.2Formulation béton autoplaçant léger.....74
III -4 Procédure de malaxage…… 76
III -4 Les essais…….…… 77
III -4.1 L'essai d'étalement 77
III -4.2 L'essai a l'entonnoir en V (V-Funnel) …… 78
III -4.3 L'essai de la boîte en « L » 79
III -4.4L'essai de stabilité au tamis 81
III -5 Conservation des éprouvettes.....82
III - Conclusion …… 82
CONCLUSION GENERALE

Tableau I.1 - Valeurs préconisées pour les essais A.F.G.C **[9]**…… 20
Tableau II.1 : les resulatats de l'eatalement…… 45
Tableau II.2 : les classes de viscosité apparente.....46
Tableau II.3 : Taux de remplisage…… 47
TableauII.4 :la masse volumique réelle sèche et les résistances moyennes à la compression…… 51
Tableau III.1 :L'analyse chimique du ciment et composition du clinker (Fiche Technique) 64
Tableau III.2 : Essais physiques sur ciment. …… 65
Tableau III. 3. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge..... 65
Tableau III. 4: La résistance thermique de liège 67
Tableau III. 5: Analyse granulométrique du liège…… 67
Tableau III. 6 : représente les caractéristiques physiques de sable d'OUED SOUF… 69
Tableau III 7 : Analyse granulométrique du sable…… 69
Tableau III.8 : Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique gravier …… 70
Tableau III. 9 : Analyse granulométrique du Gravier 3/8.....70
Tableau III. 10 : Analyse granulométrique du Gravier 8/16.....71
Tableau III. 11 : Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLOW 30.....72
Tableau III. 12: les résultats de la 1er formulation…… 73
Tableau III. 13: les résultats de la 1er formulation 2…… 75
Tableau III. 14: résultats de slump flow…… 77
Tableau III. 15 : résultats de L'essai V-funnel…… 78
Tableau III. 16 : Les résultats Essai de boite en L …… 80
Tableau III. 17 : résume les résultats de l'éssais…… 81

Figure 1.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.....5
Figure 1.2 : Structure du laitier.....8
Figure I.3 : Pâte de ciment non adjuvantée…… 10
Figure I.4: Pâte de ciment additionnéed'un super-plastifiant …… 10
Figure I.5 : Pâte de ciment non adjuvantée …… 11
Figure I.6 : Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant (0.3 pour cent). 11
Figure I.7 : photo de cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement 18
Figure I.8 : Schéma de la boite en L …… 19
Figure I.9 - Représentation de l'essai de stabilité au tamis 20
Figure I.10 : Entonnoir à mortier…… 21
Figure I.11 : Essai d'étalement modifié.....21
Figure I.12 : Les massifs d'éoliennes à Plougras 34
Figure I.13 : Le pont Akashi Kaikyo.....35
Figure I.14 : La tour Landmark Tower…… 35
Figure II.1 : Coupe d'un béton auto-placant léger…… 39
Figure II.2 : La pouzzolane …… 41
Figure II.3: la pierre ponce …… 41
Figure II.4: l'argile expansée…… 41
Figure II.5: Le polystyrène…… 41
Figure II.6: Le liège expansée…… 42
Figure II.7: galette de béton pour l'essai d'etalement …… 45
Figure II.8: l'essai de V funnel…… 46
Figure II.9: L box…… 47
Figure II.10 : la résistance moyenne à la compression de BAPL 50
Figure II.11 : la résistance moyenne à la compression…… 52
Figure II.12 : Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression de BAPLSN…… 53
FigureII.13:Comparaison entre les modèles de prédiction du module d'élasticité et les résultats expérimentaux…… 53
FigureII.14 : Traction par fendage 54
FigureII.15 : la substitution du sable normal par du sable léger de schiste expansé 56
FigureII.16 : Coulage de BAP…… 58
FigureII.17 : Quelques projet realisés par BAPL…… 59
FigureII.18 : Quelques projet realisés par BAPL…… 61
Figure III.1 : Ciment matine…… 62
Figure III.2 . Granulats de liège 8/16.…… 66
Figure III.3 La courbe d'Analyse granulométrique du liège…… 68
Figure III.4 : Le Sable D'oued Souf…… 68
Figure III.5 : Les graviers naturels utilisés.…… 69
Figure III.6 : Analyse granulométrie de sable -gravier 3/8 – gravier 8/16…… 71
Figure III.7 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant…… 76
Figure III.8 : malaxage de BAPL…… 76

Figure III.9 : L'essai d'étalement ou (slump flow)…… 77
Figure III.10 : L'essai V-funnel 78
Figure III.11 : Essai de boite en L 80
Figure III.12 :Essai de stabilité au tamis 81

Introduction générale

Le béton occupe la première place mondiale en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. De nos jours, il doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. Dans ce but, les recherches continuelles ont permis l'émergence de bétons spéciaux : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

Le béton autoplaçant (BAP), « self compacting concrete (SCC) en anglais », constitue une véritable révolution culturelle des bétons. Il se distingue par sa fluidité, sa déformabilité et sa facilité de mise en place sans vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et permet ainsi la réalisation de formes compliquées ou d'ouvrages à densité d'armatures élevée tout en présentant généralement des surfaces de meilleure qualité. Le béton est qualifié d'autoplaçant lorsque le matériau final répond à certaines exigences à l'état frais et à l'état durci. Ainsi, sa formulation doit au moins contenir un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les conditions de maniabilité et de stabilité. Sur le plan rhéologique, les bétons auto-plaçants sont caractérisés par un seuil de cisaillement inférieur à 100 Pa et une viscosité comprise entre 20 et 100. [104]

L'utilisation des granulats légers (GL) en remplacement partiel des granulats normaux (GN) dans les bétons a augmenté récemment pour la réparation en raison de la baisse du poids propre du matériau. Le comportement de plusieurs infrastructures en service a démontré que la durabilité des bétons incorporant des GL est souvent améliorée en raison de la meilleure ZT1 (Zone dé transition interfaciale) qui rend le béton moins micro-fissuré.

L'association de ces deux familles de granulats ouvre donc la voie à un nouveau béton qui aurait l'avantage d'être à la fois auto-plaçant et léger.

Le béton auto-plaçant léger (BAPL). Il peut combiner les propriétés mécaniques et thermiques du béton léger de structure et les propriétés rhéologiques intrinsèques du béton auto-plaçant . [104]

Cependant, la différence de densité entre les granulats légers et la pâte d'une part et le pouvoir absorbant des granulats légers vont compliquer davantage la formulation et la production des bétons auto-plaçants légers . La structure alvéolaire qui confère la légèreté aux granulats légers est à l'origine de deux problématiques à considérer que sont l'absorption et la ségrégation. La grande porosité des granulats légers engendre une forte absorption en présence d'eau. Cette absorption d'eau peut de façon substantielle modifier les paramètres de formulation notamment le rapport eau efficace/liant et la masse volumique réelle à l'état frais du béton (ACI 211. 2-98 1998). Ce phénomène peut également réduire l'ouvrabilité du béton frais en provoquant un raidissement prématuré des BAPL.

De plus, la légèreté des granulats légers est également la principale cause de ségrégation dans les mélanges incorporant des granulats légers (Kim et al. 2010). La différence de densité entre les granulats légers et la matrice cimentaire peut favoriser la séparation entre les phases et accroitre la propension des BAPL à la ségrégation . [104]

L'objectif de ce travail s'articule autour de l'élaboration de bétons autoplaçants léger à partir de la substitution du granulat usuel par les grains de liège expansé et d'examiner les performances, et les caractéristiques à l'état frais, par rapport à un béton autoplaçants témoin.

Ce mémoire s'organise en trois parties :

• Une partie théorique ; qui est une synthèse bibliographique qui comporte un rappel des définitions fondamentales sur les bétons autoplaçants (BAP). Les méthodes de formulation d'un BAP, les essais de caractérisation à l'état frais et à l'état durci, ainsi que les utilisations du BAP ses avantages et ses inconvénients sont également mentionnées avec quelques exemples des ouvrages construits en BAP.

• Une deuxième partie qui est consacrée à l'identification du BAPL et de donner un coup d'œil sur son historique, sur les méthodes de formulation, les essais de caractérisation à l'état frais, ainsi que les utilisations du BAPL ses avantages et ses inconvénients sont également mentionnés.

• Une partie expérimentale ; consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons autoplaçants légers. La méthode de formulation ainsi que les compositions retenues pour le BAP et le BAPL y sont mentionnées. Puis, sont détaillés les essais sur bétons à l'état frais. Enfin, nous présentons les résultats obtenus et leurs discussions.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats trouvés.

Chapitre 01 :

Béton autoplaçant

I.1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années 80 **[1].** Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus « performants » pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau **[2].** La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier. **[3]**

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés bétons de hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons auto-compactants, ou bétons auto-nivelants, selon les applications. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employées. Il existe deux catégories de bétons fluides **[2]:**

- Les bétons auto-nivelants (BAN), employés pour un coulage horizontal (de dallages industriels, planchers et chapes flottantes) ont des résistances en compression équivalentes à celles des bétons ordinaires jusqu'à 40MPa, du fait des forts rapports E/C<0,5. Ce béton est moins visqueux que le béton autoplaçant et plus robuste vis-à-vis de la ségrégation, malgré une plus grande fluidité, rendue possible grâce à l'ajout d'agents viscosants (amidons, welan gum, etc).**[3]**

- Les bétons autoplaçants (BAP), employés pour un coulage vertical (voiles) peuvent atteindre des résistances beaucoup plus élevées comme celles d'un béton à hautes performances, soit jusqu'à 80MPa. Cette gamme de résistance plus étendue est obtenue en jouant sur la teneur en eau ou sur la nature des poudres (ciment et additions minérales) qui peuvent être inertes, hydrauliques ou pouzzolaniques. Les viscosités de ces bétons sont plus élevées car les rapports E/C sont relativement plus faibles que ceux des BAN. Ce qui permet d'atteindre des résistances en compression de l'ordre de ceux des BHP**[3]**

HISTORIQUE

L'idée d'un béton fluide ou béton autoplaçant (BAP) est apparue en 1989, alors que les japonais avaient besoin d'un béton qui n'exige pas une main d'œuvre nombreuse et qualifiée, et qui fournisse une résistance à la compression élevée à jeune âge pour pouvoir augmenter la productivité. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les grattes ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides **[2,4]**.

L'historique du BAP se résume par l'élaboration du premier prototype de BAP au Japon, puis par le développement de la première génération caractérisée par sa forte teneur en liant de l'ordre de 500 à 600 kg/m^3, et enfin par, le développement de la deuxième génération de BAP au Canada caractérisée par une faible teneur en liant et un remplacement élevé du ciment par des ajouts minéraux. Selon la littérature, nous pouvons résumer son historique par les trois périodes suivantes**:[5]**

- La première période a débuté en 1986 avec le besoin pour un béton fluide. Sa formulation s'inspire alors des bétons utilisés pour les travaux de réparation sous l'eau,
- La deuxième étape dans l'évolution des BAP est l'exportation de cette technique en dehors du Japon. En effet, la technique des BAP s'est vite répandue en Europe et au Canada **[6].** Pendant cette phase, le BAP est appelé : BAP de première génération, dû à sa teneur élevée en liant. Les recherches et les études sur l'exploitation des ajouts minéraux et sur les méthodes de formulation d'un tel béton furent l'objectif primordial des chercheurs.
- L'avancement technologique et le développement des BAP ont permis de diversifier leur utilisation; beaucoup d'ouvrages d'art furent construits, notamment au japon et aussi en Europe et au Canada. Par contre, l'usage de ces bétons demeure restreint au domaine des réparations, d'où l'idée de développer une troisième génération de BAP, qui marque le début de la troisième étape dans la recherche sur ce matériau. La raison principale est d'ordre économique, car le coût unitaire du BAP est trop élevé.

Le premier prototype d'un BAP a vu le jour à l'université de Tokyo en 1986 grâce aux travaux du professeur H.Okamura **[7,8]**. Les caractéristiques de cette première génération des BAP se résumaient sur les points suivants :

- À l'état frais : une déformabilité et une maniabilité favorable,
- A jeune âge : éviter toute défaillance (fissurations, prise),
- A l'état durci : protection contre les agressions extérieures.

Les chercheurs K. OZAWA ET K. MAEKAWA de Université de Kochi (Tokyo) ont développé le premier prototype de BAP pendant l'été de 1988. 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**[9].**

Définition

Plusieurs termes définissent ce béton : béton auto-nivelant, béton auto-compactant (SCC en anglais), ou béton hyper-fluide. Sauf mention, nous employons par la suite l'appellation « Béton Autoplaçant » ou « BAP » sans distinguer les applications, d'ailleurs cette appellation et la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction. Les bétons autoplaçants constituent une nouvelle génération de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures face à une main-d'œuvre de moins en moins qualifiée. **[10]**

Cette gamme de béton se caractérise par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en étant stable et garantit des structures résistantes et durables. Ces bétons peuvent être mis en place sans apport de vibration, en assurant un bon remplissage des coffrages, au travers de zones confinées seulement sous l'effet de la gravité, tout en développant une bonne compacité sans exiger une main-d'œuvre spécialisée durant la consolidation. Ces propriétés contribuent à assurer un béton durable de qualité. Selon la densité du ferraillage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé car il ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène **[11].** Ce qui représente une économie de main-d'œuvre considérable. **[10]**

Un BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super-plastifiant. **[12]**

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage. **[13]**

Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une bonne stabilité est liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or l'augmentation de la teneur en liant n"est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de la chaleur et le risque de nuire à la capacité de remplissage. **[14]**

Cette complexité amène à combiner différents paramètres pour obtenir la résistance à la compression recherchée. Mais avant d'atteindre cette étape, il est indispensable de s'assurer d'une part de la bonne capacité de remplissage de ces bétons, donc une déformabilité supérieure à celle des bétons ordinaires **[15].** D'autre part, il faut s'assurer de la stabilité du mélange et éviter, par conséquent, la ségrégation **[16, 17].** Très souvent, la satisfaction de ces deux exigences entraîne un compromis. Autrement dit, en plus de garantir un étalement compris entre 500 et 700 mm et d'assurer une très bonne capacité de remplissage, il faut que l'agent de viscosité introduit pour améliorer la viscosité ne réduise pas les performances mécaniques du béton **[18, 19].** En effet, l'utilisation d'un agent colloïdal peut augmenter l'air occlus dans des proportions suffisantes pour réduire significativement la résistance du béton. Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais **[20].** Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- Une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement) ;
- Une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point.

Composantes du BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire, dans cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant.

Comme tout type de béton, les BAP sont composés de matériaux de base soit de ciment, de sable, de granulats et d'eau. Afin d'assurer leur fluidité et leur homogénéité. Les bétons autoplaçants nécessitent l'utilisation de super-plastifiants et d'agents de viscosité, ainsi que les ajouts minéraux. Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités afin d'en améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la matrice du béton. **[5]**

Les adjuvants principaux capables de modifier l'écoulement des bétons autoplaçants, et qui entrent dans leur formulation de base sont les super-plastifiants.

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants. Nous décrivons dans ce qui suit les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, additions minérales, granulats, adjuvants et eau).**[5]**

La figure 1.1 présente la comparaison entre la composition d'un béton fluide autoplaçant et d'un béton ordinaire.

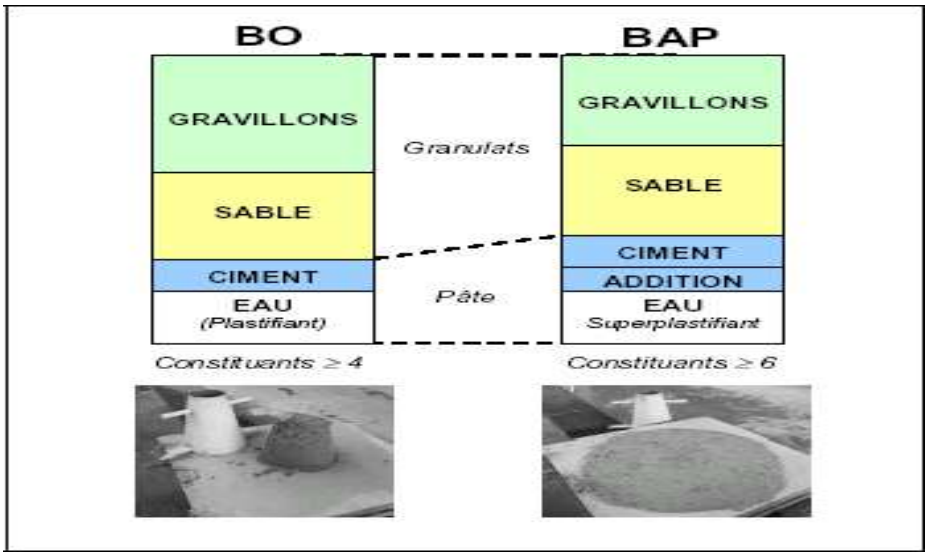


Figure I.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.
Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP

I-4.1 Ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, c'est à dire faire en sorte que le béton (ou la pâte de ciment) reste en phase dormante pendant une période suffisamment longue (de l'ordre d'une heure et demi) avant le passage à l'état solide. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation. Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, etc.) Du point de vue rhéologique, les propriétés du ciment influant sur l'écoulement de la pâte d'un béton sont principalement la composition minéralogique, la granulométrie et la finesse. **[5]**

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Le rapport Eau/Ciment (E/C) est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons. Ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passait par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton.**[3]**

I-4.2 Les granulats

On appelle granulats les matériaux inertes, sable gravier ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons et constituent leur squelette. C'est l'ensemble des grains minéraux de

dimensions comprises entre 0 et 125 mm **[21]**, et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais. **[10]**

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton **[22].**

La fluidité d'un béton autoplaçant est contrôlée par l'état de contrainte entre les particules qui le constituent. En effet, pour que le béton s'écoule bien, il est primordial de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides (gravier, sable, additions minérales, liant) qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement. L'utilisation de granulats roulés (de forme plus ou moins sphérique) peut être avantageuse lorsqu'on désire réduire les frictions entre les granulats **[23]**. Le volume des gros granulats dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération.

Afin d'empêcher tout risque de blocage du béton par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre différent **[24].**

De plus la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire, afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable (G/S) est proche de 1 **[23]**

I-4.3 Les ajouts

L'utilisation des ajouts est très importante, car en plus des économies d'énergie et de la diminution de l'émission du CO_2, ils améliorent les propriétés du béton frais et durci. Ils augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP aussi sa compacité donc des résistances mécaniques plus élevées.

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, comme substitution du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement broyés tels que le laitier de haut fourneau, la

fumée de silice, les cendres volantes qui viennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

Dans le monde, on dispose d'à peu près 250 millions de tonnes par an de laitier de haut fourneau. Cependant l'utilisation des additions minérales n'est que d'environ 90 millions de tonnes pour produire au moins 280 millions de tonnes de béton aux additions minérales **[25]**.

Le laitier de haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour sa qualité. Les laitiers de même origine ont des propriétés assez constantes et une composition chimique voisine de celle du ciment Portland, tandis que la composition des cendres volantes peut être très variable. **[3]**

Les laitiers de haut-fourneau sont des résidus provenant de l'industrie de fer. Le laitier est le résultat de la fusion du fondant (pierre à chaux ou dolomite) avec la gangue (résidus silico-alumineux du minerai de fer) et les résidus de coke dans le haut-fourneau. Une fois séché et broyé, le laitier ayant subi une trempe à l'eau contribue par sa composition minéralogique et chimique à améliorer certaines qualités du béton. Son effet sur les bétons frais et durcis est proportionnel à son pourcentage de substitution et à sa finesse **[26,27]**.

La composition chimique des laitiers a évolué dans le temps puisque le procédé métallurgique a évolué. Aujourd'hui les laitiers ont une composition chimique assez constante. En moyenne, le laitier contient 35 % de SiO_2, 40 % de CaO, 8 % de MgO et 12 % de Al_2O_3. Tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. **[5]**

La structure du laitier peut être assimilée à celle d'un filet dont l'ossature est formée d'un réseau silicaté covalent et dont certaines mailles ont été coupées aux ponts les plus faibles (Figure1.2).**[28]**

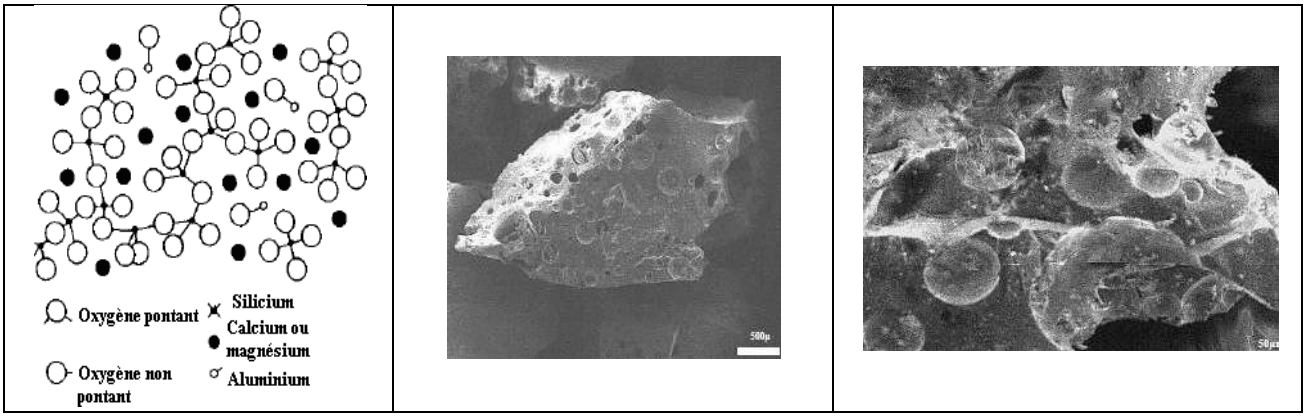


Figure I.2 : Structure du laitier **[28]**

Comme tous les ajouts minéraux, l'objectif principal est de remplir les pores afin d'améliorer l'ouvrabilité et la maniabilité par rapport à un béton conventionnel. Manai **[29]** explique ce phénomène par les caractéristiques des surfaces des grains de laitier qui permettent un meilleur glissement inter-granulaire dans la pâte. Il souligne aussi le très faible taux d'absorption d'eau par les grains de laitier au début du malaxage.

En général, il est considéré que la présence du laitier dans le béton améliore son ouvrabilité en raison d'abord, de sa plus faible réactivité que le ciment, et aussi, en raison de sa plus faible densité, la quantité de la pâte est plus élevée dans le mélange de béton **[29].**

L'addition de laitier favorise le taux de ressuage du béton, quel que soit le type de laitier. Ceci peut s'expliquer par la faible absorptivité des particules de laitier et le retard de prise.

Néanmoins, il faut souligner que les bétons préparés avec du laitier ont des résistances moins élevées que les bétons ordinaires durant les premiers jours. Cependant, cette résistance se développe à partir du vingt-huitième (28) jour jusqu'à 90 jours **[30].**

Cependant, les études réalisées sur les mortiers montrent que les mortiers au laitier sont de 10 à 100 fois moins perméables à l'eau que les mortiers de ciment Portland. De même, le remplacement de 10 % du ciment par du laitier permet de réduire l'épaisseur de la zone de transition **[29].** La durabilité des bétons contenant du laitier de haut fourneau dépasse celles d'un béton à base d'un ciment portland. Néanmoins, la finesse du laitier est un facteur à prendre en considération dans le cas du fluage, plus les particules du laitier sont fines plus le fluage est important. Par contre le retrait est moins important surtout à 28 jours.

I-4.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faibles quantités, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton**.** Les adjuvants nécessaires pour la formulation des BAP sont les super-plastifiants, l'agent de viscosité et Agents entraîneurs d'air:

I-4.4.1 Super-plastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d‟en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d‟eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d‟eau introduite lors du gâchage. L‟utilisation de superplastifiants nous permet

d‟obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation **[31].**

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d‟applications, selon que l‟utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l‟emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d‟un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d‟un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d‟utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées **[32].**

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s‟agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l‟ajout de superplastifiant, l‟augmentation des résistances ne s‟obtient qu‟avec une réduction d‟eau. Or, une réduction d‟eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu qu‟en augmentant la quantité d‟eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau.

L‟utilisation de superplastifiant permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau **[12].**

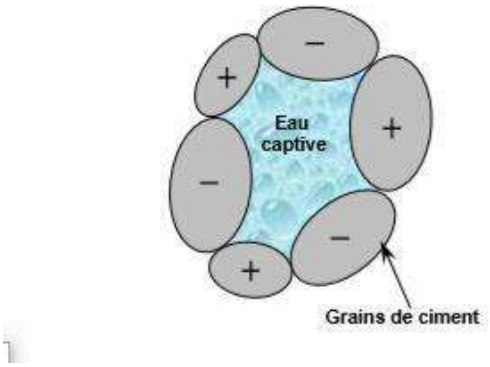


Figure I.3 : Pâte de ciment non adjuvantée

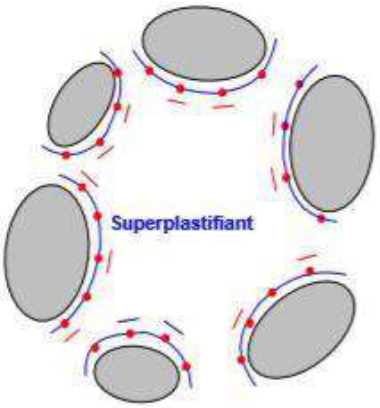


Figure I.4: Pâte de ciment additionnée d’un super-plastifiant

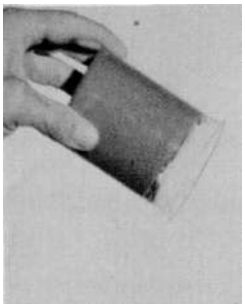


Figure I.5 : Pâte de ciment non adjuvantée

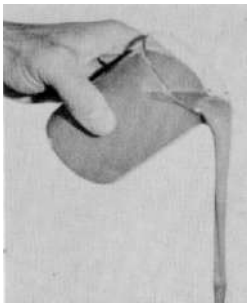


Figure I.6 : Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant (0.3 pour cent).

I-4.4.2 Agents de viscosité

L'utilisation des agents de viscosité dans la formulation des bétons fluides est devenue récemment une nécessité pour garantir une bonne résistance à la ségrégation du béton, sans pour autant nuire à la fluidité qui est assurée par l'utilisation des super-plastifiants. En effet, ces derniers augmentent souvent les risques de ségrégation des bétons, et la séparation des phases entre les constituants peut être la conséquence d'un manque de cohésion entre les phases, généralement les super-plastifiants diminuent la viscosité du béton. Les agents de viscosité sont donc utilisés en même temps que les super-plastifiants pour augmenter la viscosité du béton. Ils ont eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle peut aller du simple épaississement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation. **[5]**

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles **[33].** Khayat et al. **[33]** ont fixé 3 catégories générales pour les agents de viscosité : les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques.

Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements

libres d'eau, réduisant le ressuage. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges **[33].**

Les agents de viscosité peuvent avoir une seconde fonction, le retard de prise, ainsi que l'entraînement d'une certaine quantité d'air, entraînant des conséquences sur la résistance mécanique du béton. Les effets secondaires sont fonction du type et du dosage de l'agent de viscosité utilisé. **[5]**

I-4.4.3 Agents entraîneurs d'air

La résistance des bétons exposés aux cycles de gel-dégel est très reliée à l'existence d'un réseau uniforme des petites bulles d'air d'une taille et situées à une distance bien déterminée, qui agissent comme des réservoirs de sécurité quand l'eau gèle et augmente de volume. La plupart des agents entraîneurs d'air sont anioniques à cause de la bonne stabilité de l'air entraîné. Ce sont des produits organiques qui, quand ils sont ajoutés à l'eau d'un béton, entraînent une quantité définie d'air, sous forme de bulles microscopiques (90% < 100 µm de diamètre et 60% < 20 µm), ils réduisent la tension à l'interface air-eau, stabilisent l'air formé pendant le malaxage et le fixent au cours du durcissement. Ils ont un groupe polaire (habituellement le groupe carboxylate ou sulfonate) attaché à une chaîne hydrocarbonée. **[12]**

Un agent entraîneur d'air n'entraîne pas d'air, mais il stabilise l'air piégé pendant le malaxage. Plus la bulle d'air dans le béton est petite, plus grandes sont les pressions d'air à l'intérieur. Ces bulles d'air sont dissoutes à cause de la tension de surface du liquide et elles disparaissent complètement ou grossissent. Quand l'agent entraîneur d'air est ajouté dans le béton, le groupe hydrophile (chargé négativement) s'oriente dans l'eau et le groupe hydrophobe (la chaîne hydrocarbonée) à l'intérieur de la bulle d'air, ce qui forme un film qui baisse la tension de la surface et stabilise les bulles **[34]**. Les molécules d'un agent entraîneur d'air peuvent être adsorbées sur les grains de ciment ou de sable. Dans ce cas, les bulles d'air diminuent les frictions internes, la ségrégation des granulats et le ressuage dans le béton **[34]**.

I-4.5 l'eau

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés **[35]** qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.**[36]** L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité

diminuent. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. König et al **[37]** ont utilisé, avec succès, de l'eau recyclée pour la fabrication d'un béton autoplaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi.

Formulation du BAP

Un béton autoplaçant est un mélange qui demande beaucoup de minutie et qui doit être bien contrôlé lors de la formulation, de la fabrication et de la mise en place. Les nombreux constituants des BAP rendent leur dosage complexe. Tous les constituants d'un béton créent des interactions complexes. La variabilité des matériaux et des dosages, particulièrement des ajouts minéraux et du super-plastifiant, peut facilement affecter les propriétés et causer des problèmes lors de la production des BAP. C'est pourquoi ces bétons nécessitent une bonne analyse de ses propriétés à l'état frais et durci. **[5]**

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation.

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée **[38], [39], [40],** , car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

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 généralisée, 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/m^3.
- La masse de ciment est en général de 300 à 350 kg/m^3. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m^3.
- Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage de saturation.

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

I-5.1 Méthodes de conceptions du BAP

Jin affirme qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays. Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde, on peut citer :

Approche japonaise

Considérée comme la méthode générale de formulation, l'approche japonaise a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, Ozawa et al **[40], [41], [42], [43], [44]** (documents pour la plupart en japonais, ceux-ci sont rapportés par **[45]**). En général, cette approche consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances et pour satisfaire les critères d'ouvrabilité. Le volume du gravier est fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton. Selon les auteurs, ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés. En effet, pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. Toutefois, le volume de gravier dans cette méthode est généralement sous-dimensionné pour pouvoir éviter les risques de blocages, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait (le volume de la pâte étant important). Le béton obtenu est ainsi loin d'un optimum économique. De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. En effet, Edamatsu et al **[39]** ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier

et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton. Travaillant avec des matériaux locaux, d'autres auteurs (Pelova et al**[45]**) ont trouvé qu'il est possible d'augmenter le volume de gravier dans le béton à la hauteur de 60% du volume solide total, et obtenir un béton autoplaçant. Le volume total de pâte est réduit de 10% par rapport à celui obtenu avec la méthode générale. **[46]**

Approche CBI (Méthode suédoise)

La méthode de formulation suédoise est développée par CBI (Cement och Betong Institutet) **[47], [48],[49]** et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Elle permet d'optimiser la taille maximale des granulats par rapport à l'espacement entre les armatures, et le volume des granulats dans le béton. Le principe de cette méthode s'appuie sur des tests effectués par différents auteurs ([**50], [51], [52]** - cités par **[45])** sur des mélanges de pâte de ciment et de granulats de différentes tailles, passant à travers différents espacements d'armatures. Pour chaque taille de granulats, ils ont montré qu'il existe une teneur volumique critique de granulats en deçà de laquelle le risque de blocage est nul et au dessus de laquelle le blocage est systématique. Cette teneur volumique critique est fonction de l'espacement entre les armatures (par rapport à la taille des granulats), et de la forme des granulats (roulés ou concassés). Cette méthode suppose que le phénomène de blocage est indépendant de la nature de la pâte, pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide. Les principales modifications et extensions de la méthode CBI sont apportées par Bui et al **[53],** qui a proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats. **[46]**

Approche LCPC (Méthode Française)

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible **[54],[55]** qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions

granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire. **[46]**

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (BétonlabPro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche **[55],** et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants). Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs **[55]** afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression)**.[46]**

1.5.2. Formulation JSCE

La démarche proposée en 1998 par la *Japanese Society of Civil Engineers* (JSCE) est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques **[56]**. Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont **[56]** :

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'auto-compactibilité désirée. Il est situé entre 0.30et 0.32 m^3/m^3 et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.
- Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 kg/m^3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par m^3. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m^3.
- Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre 85 et 115% en volume.
- Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en généra l0.13m^3/m^3. Dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre 0.16 et 0.19 m^3/m^3.
- La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5% d'air.
- La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau

et air).

- Le dosage de super-plastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de super-plastifiant dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les super-plastifiants de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par m^3, ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à 5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

I-5.2 Contrôle de qualité du BAP

Évidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais, qui sont reliées à la composition de la pâte de ciment qu'a celle du mélange en lui-même.

Un des avantages des bétons autoplaçants est d'améliorer la déformabilité du mélange afin qu'ils puissent remplir facilement les coffrages sans utiliser un moyen de vibration (l'étalement du béton et sa mise en place se font seulement sous l'effet de la gravité).

Les principaux paramètres qui caractérisent ces bétons sont la stabilité et la fluidité. Il existe de part le monde divers essais pour caractériser l'ouvrabilité des BAP.

I-5.3.1 à l'état frais

Les propriétés du béton frais jouent un rôle majeur dans le domaine des technologies du béton. Par exemple, les caractéristiques du béton à l'état durci dépendent souvent de celles que possédait le béton frais durant son transport, sa mise en place et sa finition.

La fluidité et l'homogénéité (la stabilité) constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais. Ces paramètres sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères (Ces critères sont : la capacité au remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité de passage) mesurables par des tests empiriques. Ces tests sont :

a)- Essai d'étalement :

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement,

à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm.

La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies. La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (fig.01), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton



Figure I.7 : photo de cône d'ABRAMS pour la détermination de l'étalement

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette :
600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm

b)- Essai de boite 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 ø 14 mm distantes de 39 mm, 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 (h1 et h2), afin de qualifier sa capacité d'autonivellement. Le rapport h2/h1 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.



Figure I.8 : Schéma de la boite en L

c)- Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-nivelant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [AFGC]. Cet essai consiste à l'utilisation d'un seau de 10 L avec un couvercle, un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20 kg et de précision de 20 g.**[9]**

Le mode opératoire d'après les recommandations de l' [AFGC] est le suivant: A la fin du

malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur le tamis, deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation, la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante:

- $0 \leq \pi \leq 15$ % stabilitésatisfaisant
- 15 % $< \pi \leq 30$ % stabilité critique, l'essai à refaire insitu.
- $\pi > 30$ % stabilité très mauvaise, béton inutilis



Figure I.9 - Représentation de l'essai de stabilité au tamis **[12]**

Tableau I.1 - Valeurs préconisées pour les essais A.F.G.C **[9]**

Etalement	60cm à 75cm
H2/H1	≥0.8
Laitance	≤15 ٪

d) Essai d'entonnoir (V-Funnel) et d'étalement modifié (J-Ring) :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies à la figure qui se suit, est rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-compactant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa

viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton BAP. **[57]**

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) 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 ø 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. **[57]**

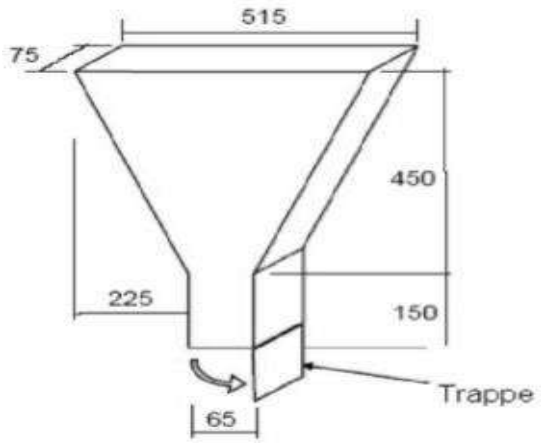


Figure I.10 : Entonnoir à mortier

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 qu'à l'extérieur de l'anneau**. (Figure I.11)**

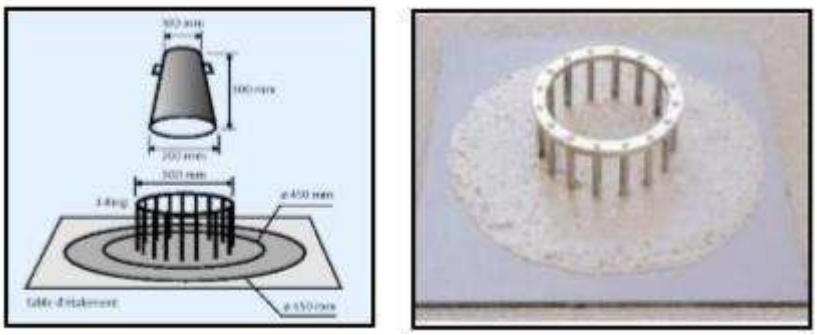


Figure I.11 : Essai d'étalement modifié

I-5.3.2 à l'état Durci

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

. La résistance mécanique

La mise au point d'une formule de béton consiste à rechercher à partir d'un composant donné (le plus souvent local), un mélange ayant à l'état frais une certaine maniabilité, à l'état durci une résistance en compression donnée, et ce au moindre coût. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier / sable) [G.DREUX ET J.FESTA]. D'une façon expérimentale les BAP impliquent un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques. **[9]** [PAULTRE ET COLL. 1996] ont fait des tests comparant les BAP aux traditionnels BHP, ils ont remarqué que les résistances en compression des BAP et BHP sont remarquables.

[GIBBS ET COLL. 1999], rapporté par [A.Daoud] ont fait des tests en comparant Les BAP aux bétons de références sur des éléments standard, ils ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des BAP et du béton vibré.

Par contre [M.SONEBI, 1999] observe que la résistance à la traction à 28j pour les BAP conservés dans l'eau est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

[L.MOLEZ], sur une série de six mélanges de béton, il a trouvé que la courbe de la résistance en compression du BAP, après le $10^{ème}$ jour se coïncide avec celle du BO. De même il a trouvé que la résistance en traction du BAP est supérieure à celle du BO. Le méme cas dans le domaine du bâtiment

.Le module élastique

Comme les BAP renferment un faible volume de granulats, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles que pour des bétons de mêmes résistances mais de rhéologie conventionnelle. Les travaux de [PAULTRE ET COLL.], précédemment cités, ont montré que les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comparable ment au BHP, ce

qui confirme cette idée a également trouvé que le module élastique d'un BAP est systématiquement inférieur à celui du BO dérivé. mais la différence n'est pas très importante , puisqu'elle se situé entre 2 et 8%.

Au contraire, [L.MOLEZ] a trouvé que le module élastique du BAP est légèrement supérieur à celui du BO.

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

De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie, et en second lieu, d'inclusion des granulats. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les granulats, les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montrent qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance **[9]**

Propriétés du BAP

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier ses différentes propriétés, Dans cette partie, nous résumons rapidement les différences qui existent entre les propriétés des bétons autoplaçants à l'état durci. Elles sont étudiées sous plusieurs aspects, les propriétés mécaniques et physiques d'une part et la durabilité d'autre part.

I-6.1 Propriétés physiques

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. Les propriétés de transfert du béton sont donc utilisées progressivement comme critère de sa durabilité**.[3]**

La prise en compte de la durabilité d'un ouvrage est indispensable pour garantir une durée de vie ou bien de service et conserver les fonctions d'usage **[58],** Plusieures recherches traitent de la durabilité des BAP. Les caractéristiques microstructurales des BAP sont

principalement influencées par : un volume de pâte élevé, la présence d'additions en quantité importante, et un réseau de bulles d'air plus ou moins dense. **[3]**

Les donnees de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure , l'absorption d'eau , Ouvrabilité , rétention d'eau et la perméabilité **[58],**La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. **[5]**

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, absorption d'eau) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée.**[46]** Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables**[46]**. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires**[46].**

I-6.2 Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition **[59].** Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait

I-6.2.1 Résistance à la compression

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges **[60 – 61**]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Différentes données ont été publiées **[62 – 63**] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes. De plus, certains auteurs **[64]** affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler est grande. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges **[65**]. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique **[66**]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

I-6.2.2 Résistance à la traction

Pour une résistance à la compression donnée d'un BAP, la résistance à la traction peut être assumée à être la même que celle d'un béton ordinaire comme le volume de pâte n'a aucun effet significatif sur la résistance à la traction **[67].**

Selon Klug et Holschemacher **[68**], la résistance à la traction des BAP est nettement supérieure à celle des bétons vibrés, elle peut aller jusqu'à 40% ce qui implique qu'il y a nécessité de revoir la section minimale de ferraillage.

Selon Guneyisi et Gesoglu **[69**] la variation de la résistance à la traction d'un béton contenant du laitier est similaire à celle d'un béton sans laitier. En général la résistance à la traction est en baisse avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange, exception est faite pour les dosages en laitier à 50 et 60% dans le cas de 90 jours de cure dans l'eau.

Dans leur article sur les BAP légers à haute résistance, Choi et al. **[70]** ont trouvé une relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction comparable à celle donnée par les règlements de béton armé. **[3]**

I-6.2.3 Module d'élasticité (en compression)

Si on se réfère à la formule réglementaire du module (Eij = 11000 fCJ1/3), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près **[71 – 72]** . D'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés **[73].**

Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène. 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). A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires **[58]** .

I-6.2.4 Retrait

Au cours de la phase plastique, le béton connaît une première contraction volumique. Après la prise, le béton, qui devient un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait :

a- Le Retrait Thermique (plastique) : Les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante. **[5]**

A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si, bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant). Cependant, les propriétés mécaniques évoluent très vite au jeune âge. Le module élastique, en particulier, est plus grand pendant la phase de refroidissement. Contrairement aux variations de température, il n'y a donc pas réversibilité des contraintes engendrées par un empêchement des déformations. Il en résulte une contrainte de traction résiduelle, pouvant mener à la fissuration du béton. **[5]**

b- Le Retrait Endogène ou d'Autodessiccation : L'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique**.**

c- Le Retrait de Séchage ou de Dessiccation : est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant.

d- Le Retrait de Carbonatation : À la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, la carbonatation, s'accompagne d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer, on parle de faïençage. À la vue du volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance d'un retrait total plus important pour les BAP. **[5]**

Comme leur retrait endogène varie entre 180 et 250 μm/m, il semble être inférieur ou égal à celui des bétons ordinaires, leur retrait de séchage est donc plus élevé (environ 800 μm/m). Ce retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C soit grand mais paraît d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé. **[5]**

I-6.2.5. Déformations sous charge (fluage)

D'après les résultats présentés par Proust **[74],** les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre. Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés. Cette concordance des comportements différés sous charge est confirmée par d'autres auteurs [**71, 75, 76].**

Ces différents résultats concernent des formulations de BAP proches de celles des bétons vibrés, notamment avec des quantités de ciment équivalentes et des rapports E/C voisins. L'influence du volume de pâte sur les déformations sous charge des bétons n'est pas réellement confirmée. Cette éventualité n'est pas exclue mais les comportements différés des BAP paraissent comparables à ceux des bétons vibrés. L'explication de cette observation n'est pas pour le moins évidente et appelle encore à quelques interrogations quant aux phénomènes impliqués dans le fluage du béton. Des études récentes **[77**] ont toutefois proposé certains mécanismes qui expliquent convenablement ce phénomène.

I-6.3 Propriétés de durabilité

La durabilité d'une structure en béton est associée étroitement à sa perméabilité. En pratique, la durabilité dépend du choix des matériaux, de la composition du béton, ainsi que du degré de supervision durant la mise en place, la compaction et la cure du béton.

Le déficit de compaction dû aux difficultés de vibration dans des espaces étroits entre les bars et le coffrage a été reconnu comme étant un facteur clé de faible durabilité pour des structures en béton exposées à des environnements agressifs. Le surpasser était l'une des raisons essentielles pour le développement des bétons autoplaçants au Japon. **[36]**

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP. La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et la résistance au gel - dégel. Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par : **[36]**

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton. **[36]**

Assié et al [**78]** ont trouvé qu'il n'y a pas une différence significative dans les propriétés physico-chimiques (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau et carbonations par le nitrate d'ammonium) pour les deux types de béton, BAP et ordinaire.

I-6.3.1 Perméabilité à l'eau

Selon Hou et al **[79]** l'invasion de substances nocives dans le béton est une question de fluidité. Ceci est gouverné par la loi de Darcy. La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux

dimensions des pores dans le mélange, plus les pores sont larges plus grande est la perméabilité. Si le rapport Eau/Ciment est en dessous de 0,32 et l'hydratation est complète, il n'y aura pas de pores cappillaires. Pour une cure de 90 jours, plus le rapport E/C est faible plus la perméabilité du béton est faible. Pour les bétons contenant du laitier, les pores cappillaires (diamètre supérieure à 100 A°) sont transformées en pores gellives (diamètre inférieure à 100 A°), ceci est dû à la réaction pouzzolanique qui améliore la densification du béton. **[36]**

I-6.3.2 Absorption d'Eau

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse (exprimée en %) de la masse sèche. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire. **[36]**

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible. Comme pour les propriétés de transfert déjà mentionnées (perméabilité et diffusion), la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés. **[36]**

Cependant, d'autres résultats **[80**] démontrent que l'absorption capillaire des BAP est inférieure à celle des bétons vibrés et elle est d'autant plus faible qu'ils contiennent des fillers calcaires ou des cendres volantes.

Selon De Schutter et Audenaert **[81],** l'absorption d'eau par immersion n'est pas un paramètre fiable pour l'estimation de la résistance contre la carbonatation et la migration de chlorures. L'absorption d'eau par immersion donne une idée globale de la porosité totale du béton. Malheureusement, l'absorption d'eau par immersion n'est pas fortement corré1ée avec la permdabilité ; celle-ci est un paramètre plus important pour la durabilité.

Selon Guneyisi et Gesoglu **[69],** les caractéristiques de l'absorption d'eau du béton diminuent avec l'augmentation du dosage en laitier indépendamment des conditions de cure et de l'âge. Par contre les différences dans ces caractéristiques, entre le béton avec laitier et sans,

deviennent plus signifiantes à cause de la méthode de cure après 28 jours et sont remarquablement plus faible pour le béton au laitier. D'autres par et contrairement au laitier, Dinakar et al [**82]** ont montré que les BAP avec dosage élevé en cendres volantes accusent une grande absorption d'eau.

I-6.3.3 Perméabilité au Gaz

La perméabilité au gaz est influencée par la quantité de l'eau interstitielle, du rapport E/C et de la pression d'essai **[83].** Certains travaux **[84]** ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. D'après ces données, il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité des ces bétons.

D'autres résultats **[80,85]** relatifs à la durabilité des BAP montrent que leur perméabilité à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés. Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation d'additions minérales dans les BAP. L'influence d'autres paramètres distinguant les BAP des bétons vibrés n'a pas été clairement élucidée. Le volume de pâte, par exemple, n'entre pas dans les éléments de comparaison de la perméabilité de deux types de béton.

D'après Assié dans sa thèse **[86]** la formulation de BAP est plus résistante à la pénétration d'un gaz tel que l'oxygène que la formulation de béton vibré correspondante, ainsi la perméabilité au gaz pour un BAP60 est plus faible que celle d'un béton vibré BV60.

I-6.3.4 Perméabilité aux ions Chlore

Les ions chlore peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton, ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance

du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même). **[36]**

La diffusion des ions chlore à travers le béton varie aussi avec le rapport E/C mais l'influence de ce dernier sur la diffusion est bien moindre que sur la perméabilité.

Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions Chlore entre les BAP et les bétons ne permettent pas d'en déduire une tendance générale. Certains auteurs **[87]** ont

évalué le comportement de bétons autoplaçants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions Chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10-12 m²/s au lieu de 15 à 18.10-12 m²/s). Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire. **[36]**

D'autres auteurs observent expérimentalement que les BAP possèdent des coefficients de diffusion des ions chlore équivalents **[88],** sinon meilleurs que les bétons vibrés.

D'après Zhu et al **[80],** la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'addition minérale employé dans le béton. Les bétons formulés avec (BAP SCC1) ou sans filler calcaire (BAP SCC3 et béton vibré REF1) présentent des coefficients de migration des ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire. Ces auteurs indiquent également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons.

Toutefois, pas mal d'auteurs estiment que les résultats indiquant des comportements équivalents des BAP et des bétons vibrés vis-à-vis du mécanisme de diffusion sont les plus courants **[75,89-90] .**

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette comparaison, en prenant le BAP SCC1 comme référence, la quantité de ciment est moins importante dans le BAP SCC3 ce qui engendre une augmentation du rapport E/C et conduit à une structure poreuse plus grossière

Ainsi, le coefficient de diffusion est diminué quel que soit l'âge de l'essai. Dans le BAP SCC4, la quantité de ciment plus importante a conduit cette fois-ci à un coefficient de diffusion plus faible que le BAP SCC1. Ceci prouve bien l'influence importance du rapport E/C sur le coefficient de diffusion des bétons. **[36]**

En ce qui concerne la comparaison BAP - béton vibré, ces résultats montrent que le béton vibré (TC) possède un coefficient de diffusion équivalent à celui du BAP pris comme

référence. Enfin, le BAP formulé avec des cendres volantes (SCC6) dispose d'un coefficient de diffusion très faible en raison de sa structure poreuse très dense. **[36]**

Selon Guneyisi et Gesoglu **[69]** les bétons au laitier, surtout dans le cas de fort dosage en laitier (plus que 50%), ont une perméabilité aux ions chlore remarquablement faible par rapport aux bétons sans laitier. Très récemment Güneyisi et al **[91]** ont confirmé l'avantage du laitier dans la réduction de la perméabilité des ions chlore surtout dans les conditions de cures

à long terme. Des résultats similaires ont été observés pour les BAP contenant un fort dosage en cendres volantes selon Dinakar et al **[82].**

I-6.3.5 Gel-Dégel des BAP

Selon Ramachandran et al **[92]** L'action de gel du béton est définie comme le gel et dégel de l'humidité dans les matériaux constituant le béton. Une bonne résistance au gel peut être obtenue avec un bon choix et proportionnement des matériaux. En plus du rapport E/C, la qualité des agrégats et la quantité d'air dans le mélange, la résistance du gel dépend des conditions de cure. Un béton sec supporte bien le gel/dégel, par contre un béton saturé d'eau peut être sévèrement endommagé par quelques cycles de gel/dégel. En général, la meilleure approche pour la prévention contre l'attaque du gel dans le béton est l'utilisation d'un adjuvant entraineur d'air. Toujours selon les mêmes auteurs, l'essai le plus largement utilisé pour déterminer la résistance au gel/dégel du béton est l'essai « ASTM C 666 » (résistance du béton au gel/dégel rapide), qui comporte deux procédures A et B, pour la procédure A, le gel et le dégel se passent avec un spécimen entouré d'eau, tandis que pour la procédure B, le spécimen est gelé dans l'air et dégelé dans de l'eau. **[36]**

Les bétons à haute performance, du fait notamment de leur compacité accrue qui les rend moins perméables et leurs caractéristiques à la traction plus élevées, présentent une très bonne résistance aux cycles de gel/dégel, tenue qui peut encore être améliorée par adjonction d'un entraineur d'air **[93].**

Khayat et Assaad **[94]** ont trouvé que l'addition d'un adjuvant haut réducteur d'eau peut déstabiliser les bulles d'air entrainées dans le béton durant le transport, ce qui peut affecter le système des vides, mais malgré ça une résistance au gel/dégel peut toujours être obtenue avec des adjuvants haut réducteurs d'eau. Les résultats de leurs essais ont montré que les caractéristiques des poches d'air d'un BAP peuvent être similaires à celles d'un béton vibré. Ils ajoutent aussi qu'en général une plus grande stabilité des poches d'air est obtenue

quand le mélange du BAP contient une plus grande proportion de pâte de ciment et un plus faible rapport eau/ciment, sauf si un agent de viscosité est incorporé au mélange.

Persson **[95]** a trouvé que le BAP exhibite mieux la résistance interne du Gel que le béton ordinaire, et qu'un BAP contenant 6% d'air résiste mieux au gel qu'un BAP contenant 8% d'air. Hans-Erik et Pentti **[96]** ont aussi confirmé que le BAP a une résistance au gel meilleure que celle d'un béton ordinaire.

Lang et Geiseler **[97]** ont montré que contrairement au ciment portland les ciments au laitier ont une grande résistance au gel-dégel. Bassuoni et Nehdi **[98]** ont trouvé que l'introduction d'un entraineur d'air dans un BAP est très nécessaire surtout dans un climat froid, pour protéger le mélange exposé à des cycles de gel/dégel.

Utilisation du BAP

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages. **[99]**

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage. L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe **. [99]**

Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc. Walraven **[100]** précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes **. [99]**

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil **[101].**

La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

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

– densités de ferraillage importantes ;

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

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

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

– exigences architecturales et qualité de parement particulière.

Exemples des ouvrages construits en BAP

On peut citer quelques ouvrages réalisés en BAP:

• Les voiles de 16 m de hauteur sur 30 cm d'épaisseur de la salle principale du cinéma mk2 Bibliothèque, à Paris

• Les massifs d'éoliennes à Plougras , comportant une densité d'armature importante (**Figure I.12**)



Figure I.12 : Les massifs d'éoliennes à Plougras**[103].**

• Le barrage Belbezet , nécessitant une consolidation des parois rocheuses et l'obstruction de cavités.

• Le pont Akashi Kaikyo **(Figure I.13),** le plus long pont suspendu au monde (3910 m) où 390 000 de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994)



Figure I.13 : Le pont Akashi Kaikyo. **[103].**

• La tour Landmark Tower **(Figure I.14),** où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA
et coll.1995)



Figure I.14 : La tour Landmark Tower. **[103].**

• Le pont Kiba park. où 650 m 3 de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de 60 MPa **;**

• Le stade de Fukuoka où 10 000m3 de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferraillées et de formes compliquées (IZUMI et coll. 1995) **.**

• Court Centrale du Stade de Roland Garros.

• Une partie du nouveau Aéroport de Roissy Charles-de-Gaulle -Paris- France

Avantages et inconvénients I-

9-1 les avantages

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques, économiques et écologiques :

Avantages techniques

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

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.

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).

Les inconvénients

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 **[102].**

On peut dire aussi que le BAP possède des caractéristiques qui peuvent être considérées comme des inconvénients à son usage. Etant un béton très fluide, le temps de séchage du béton auto-plaçant est un peu plus important. Ce type de béton peu présenter un risque élevé de ségrégation lorsque le mélange n'est pas bien effectué .de plus, son cout est un peu plus éleveé.

D'une part les additions minérales et chimiques qu'il contient un BAP est plus chère qu'un béton ordinaire.

D'autre part les BAP sont très sensibles à la variation de leurs composants et particulièrement à quantité d'eau et de superplastifiants. Ils peuvent se dégrader de manière spectaculaire si l'eau est en trop grande quantité et perdre leurs caractéristiques d'autoplaçabilité si le dosage en superplastifiant est trop faible.

II- Conclusion

Ce chapitre a été mené afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants, l'objectif étant de les définir, ainsi que de présenter leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

Chapitre 02 :

Béton autoplaçant léger

Introduction

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telle que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables sans oublier le poids et les charges qui se produit lors des ses composants, ce qui a donné l'idée de produire des bétons autoplaçants légers.

La technique d'allègement des structures ou les éléments structuraux en béton compté sur le remplacement des granulats de masse volumique normale par des granulats légers. Les granulats légers sont des granulats poreux présentant une structure interne qui est obtenue soit de façon naturelle ou artificielle par un traitement thermique. Cette structure possède des propriétés thermiques et acoustiques dont bénéficient les bétons incorporant des granulats légers.
Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les caractéristiques de BAPL en tant que matériau économique, ses propriétés aux deux états, frais et durci, propriétés mécaniques et la durabilité, l'utilisation et la conductivité thermique.

Historique

L'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine qui se situe entre 27 avant J. C. Et 476 après J. C. Plusieurs Bâtiments comme le Panthéon et le Colisée de Rome sont réalisés partiellement en béton léger. Et le dôme du panthéon avec une hauteur de 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables, dont un contenant de la pierre ponce qui est considéré comme un matériau léger. [104]

Ensuite, l'utilisation des granulats légers naturels tels que la pierre ponce, la pouzzolane, la diatomite, etc. a été ralentie jusqu'au XX ^{ième} siècle quand les granulats légers artificiels sont apparus (l'argile expansée, l'ardoise expansée, cendre volante frittée, liège)

Historiquement, l'ingénieur Hayde Stephen est le premier à fabriquer des granulats légers par l'application d'un traitement thermique sur un matériau expansible (Arnould et Virlogeux 1986) et (Tang et al. 2011). Il déposa un brevet en 1918 pour la technique d'expansion de l'argile, de l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif. C'est le début de la production et de la commercialisation des granulats légers artificiels. Les granulats légers artificiels sont désormais utilisés aussi bien dans la construction civile que dans la construction navale En France, l'intérêt pour les granulats légers artificiels s'est développé au début des années 1970 avec l'implantation de la première usine en 1964 à Watten dans le nord. Selon (Chen et al. 2012), les granulats légers sont aujourd'hui présents dans différents domaines tels que le bâtiment (béton préfabriqué et béton prêt à l'emploi). [104]

Définition

Le béton autoplaçant léger, est un béton se différenciant des autres par son **importante fluidité et la légèreté** . Une caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers. Il était fréquent de rajouter de l'eau au mélange afin d'obtenir un béton plus fluide mais cela le **fragilisait**. C'est pourquoi le BAPL est une véritable révolution. Si le béton autoplaçant léger possède une telle fluidité et légèreté , c'est grâce aux divers **adjuvants superplastifiants** et **les granulats légers** qui le composent. Ceci a rendu les constructions plus sûres et a grandement facilité les méthodes de mise en œuvre du béton. [105]

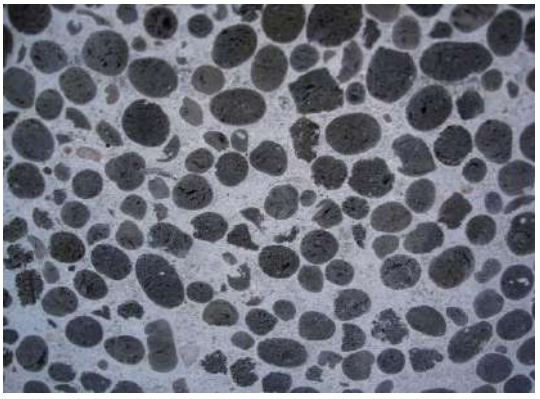


Figure II.1 : Coupe d'un béton auto-placant léger

Granulats légers pour bétons de structure

Les granulats légers sont des matériaux poreux. Avant de présenter ces matériaux, nous allons définir deux grandeurs qui caractérisent leur légèreté : la masse volumique en vrac et la masse volumique réelle. La masse volumique en vrac désigne le rapport de la masse de granulat léger sec pour remplir de façon aléatoire un récipient sur le volume du récipient. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulat léger sec sur le volume qu'elle occupe dans l'eau. Selon la norme NF EN 206-1/CN, les granulats utilisés dans le domaine de la construction peuvent être subdivisés en trois catégories :

- le granulat léger : granulat d'origine minérale ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle inférieure ou égale à 2 000 kg/m3 ;
- le granulat courant : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle comprise entre 2 000 et 3 000 kg/m3 ;
- le granulat lourd : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle supérieure ou égale à 3 000 kg/m3.

Il existe deux familles de granulats légers :

- le granulat léger naturel qui ne subit aucune transformation autre que mécanique. C'est par exemple le granulat de pierre ponce, de diatomite de tufs volcaniques etc ;
- le granulat léger artificiel résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autre. C'est par exemple le granulat d'argile expansée, de schiste expansé, de cendre volante frittée etc.[104]

II-4.1 la fabrication des granulats légers

II-4.1.1 Granulats légers naturels

Les granulats légers naturels sont des granulats d'origine minérale issus de la transformation mécanique de roches naturellement alvéolées. Ils proviennent pour la plupart de roche d'origine volcanique ou sédimentaire présentant une structure interne alvéolée. Ils sont obtenus à l'issue de diverses transformations mécaniques. Le dynamitage de la roche va donner de gros blocs. Ces gros blocs sont ensuite concassés et criblés pour donner différentes tailles de grains. [104]



Figure II.2 : La pouzzolane



Figure II.3: la pierre ponce

II-4.1.2 Granulats légers artificiels

Les granulats légers artificiels sont des granulats d'origine minérale dont l'expansion nécessite un traitement thermique préalable pour donner la structure alvéolée qui caractérise les granulats légers. En général, les méthodes d'expansion utilisées pour la fabrication des granulats sont à haute température (entre 1 100 et 1 500 °C). Il existe différents procédés qui dépendent de la matière première utilisée, du mode de préparation et du système de cuisson. [104]



Figure II.4: l'argile expansée

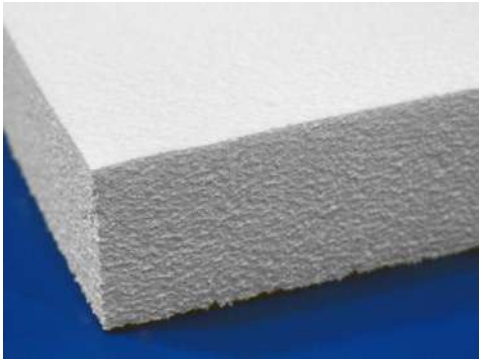


Figure II.5: Le polystyrène



Figure II.6: Des plaques de liège expansé

II-4.2 Différents types de granulats légers

Les performances mécaniques du béton léger dépendent en partie du type de granulats légers. Lorsque les critères de résistance doivent prendre le pas sur les propriétés thermiques, les granulas légers artificiels sont plus appropriés. Les principaux granulats légers d'origine minérale utilisés dans les matrices cimentaires sont les suivants :

- les pouzzolanes ;
- les granulats de diatomite ;
- les granulats de perlite et de vermiculite ;
- l'argile expansée ;
- le schiste expansé ;
- les cendres volantes frittées ;
- les granulats de laitiers bouletés expansés ;
- les granulats de verre expansé ;
- la pierre ponce.

Et il ya d'autres granulats légers comme

- Le liège
- Le polystyrène

Formulation du BAPL

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boite en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

Concernant le BAPL il n'existe pas encore de méthode de formulation généralisée. Aujourd'hui l'approche de la formulation est dans la pratique, principalement empirique. Alors que ce sont les composants essentiels d'un BAPL. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

II-5.1 Méthodes de conceptions du BAPL

Les chercheurs ont proposé des adaptations des méthodes de formulation courantes pour la composition des bétons auto-plaçants (BAP) légers. Les contributions portent notamment sur la prise en compte de l'absorption et la légèreté des granulats légers (Helland et al. 2000).[6]

Au sens la norme NF EN 206-1/CN, la teneur en eau efficace est la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats. Dans le cas des granulats traditionnels l'eau absorbable est marginale (entre 0,1 et 2 % en proportion massique). En revanche, l'eau absorbable par les granulats légers est plus importante et peut atteindre 15 % et plus en proportion massique selon (Neville 1995) et (Zhang et al. 2004). Dans la pratique, l'absorption différée du granulat léger peut se traduire par une chute brutale de l'ouvrabilité du béton en présence de granulats légers secs ou pré-humidifiés (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011). [104]

Latifou Bello rapporté que les méthodes de formulation traditionnelles de bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) sont adaptées pour la formulation des BAPL. Pour tenir compte de la forte absorption et de la légèreté des granulats légers, les auteurs ont recours :

- au pré-mouillage pour atténuer l'absorption dans la pâte ;
- à l'utilisation d'agent de viscosité pour optimisation la viscosité de la pâte afin de limiter les risques de ségrégation ;

- à l'optimisation du volume de pâte pour limiter le risque de blocage des granulats légers.

Par contre [E.LEPESQUEUX], dans son recherche, a montré que des ajouts minéraux peuvent être utilisés pour produire la quantité de pâte de ciment en excès, et il a signifié que le principal objectif de la méthode DMDA (Densified Mixture Design Algorithm) est d'obtenir un béton à haute performance très liquide pour les exigences de la construction en développant les hypothèses que les propriétés physiques sont optimales lorsque la densité physique est élevée.

II-5.2 Contrôle de qualité du BAPL

II-5.2.1 à l'état frais

Les proprietes a l'etat frais sont determinees a partir d'essais d'ecoulement et d'essais de resistance a la segregation. Les essais d'ecoulement tels que l'etalement au cone, le temps de passage a l'entonnoir en V et le taux de remplissage a la boite en L permettent d'evaluer la capacite de remplissage et de passage. Les essais de stabilite tels que l'essai au tamis et l'essai a la colonne permettent de caractériser la résistance à la ségrégation du béton. [104]

II-5.2.1.1 l'essai de etalement

L'essai d'etalement permet de mesurer la mobilite du beton auto-placant en l'absence d'obstacles. L'etalement peut etre determine selon la norme NF EN 12350-8.

Cette essai consiste a determiner le diametre moyen de la galette de béton frais obtenu après soulèvement du cône préalablement rempli. Le plus grand diamètre d'etalement (d1) et le diametre de l'etalement perpendiculaire (d2) sont mesures, l'etalement etant le diametre moyen. L'etalement note SF est la moyenne de d1 et d2 donnée par l'equation suivante :

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$

Et Latifou Bello a obtenu les resulatats suivantes :

Tableau II.1 : les resulatats de l'eatalement[104]

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

L'etalement des betons auto-plaçants légers (BAPL) identifiés dans la littérature est compris entre 550 et 800 mm.

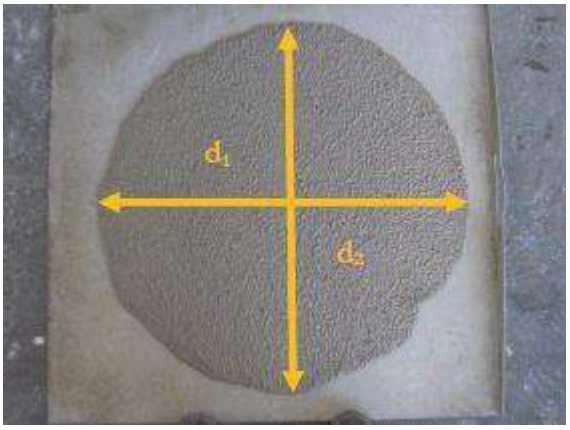


Figure II.7: galette de béton pour l'essai d'etalement [104]

Le test d'etalement nous a permet de connaitre le comportement de béton sur deux aspects (la déformabilté et le remplissage), ce dernier est obsevé sur deux coté : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage, la première est lié a la capacité de déformation de béton, elle traduit le poucentage remplit ou la distance atteinte dans l'espace, la deuxiéme est lié a vitesse de déformation, elle traduit ainsi la vitesse d'écoulement de béton . ce que nous a permis d'observer une ségrégation au niveau du galatte de béton et quelque non homogénieté entre les granulats de liége et le gravier, et les granulats légers sont regroupés à côté

II-5.2.1.2 Essai d'ecoulement a l'entonnoir en V

Un entonnoir en forme de V est rempli de béton frais afin de mesurer le temps nécessaire en secondes a l'ecoulement du beton hors de l'entonnoir. Le temps d'ecoulement a l'entonnoir en V note tV permet d'evaluer la capacite de remplissage du beton auto-plaçant et donne une indication sur la viscosité apparente. Les deux classes de viscosité apparente sont indiquées dans le **TableauII.2** tiré de la norme NF EN 206-9. En général, le temps d'ecoulement des BAPL se situe entre 3 et 25 secondes. [104]

Tableau II.2 : les classes de viscosité apparente [104]

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



Figure II.8: l'essai de V funnel

Le temps d'écoulement est souvent la critére utilisé pour définire la viscosité de BAPL, plus le béton s'ecoule rapidement hors de l'entonnoir plus sa viscosité est faible. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14secondes est recommandé pour les BAP.

Parmis les effet du granulats léger sur les BAPL, ces granulats la influencé directement sur le comportement de BAPL a l'état frai surtout sur la vitesse de mise en place et sa fluidité parce qu'ils augmentent le temps d'écoulement énormément.

II-5.2.1.3 L'essai a la boite en L

L'essai consiste a deverser du beton frais dans le compartiment vertical d'une boite en forme de L,puis à laisser s'ecouler le beton dans le compartiment horizontal a travers les espaces entre les barres d'armatures lisses et verticales.

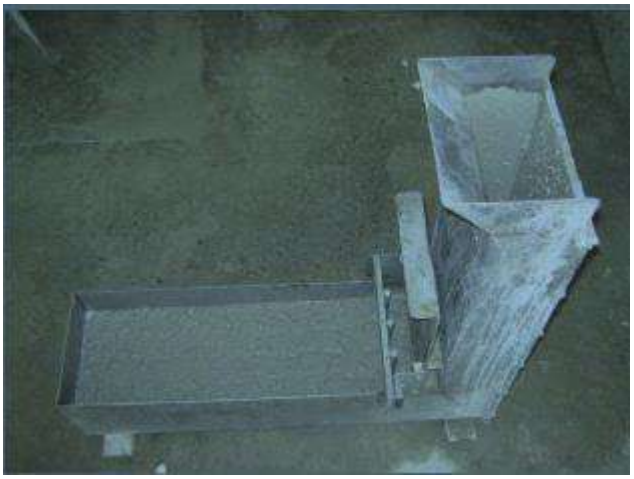


Figure II.9: L box

Les hauteurs du niveau de béton dans la partie vertical (H1) et a l'extremite de la partie horizontale (H2) sont mesurees et le rapport H2/H1 est déterminé. Ce rapport qui représente le taux de remplissage à la boite en L noté PL, permet de mesurer l'aptitude a l'ecoulement ou au blocage du béton auto-plaçant en milieu confine. Il renseigne sur la resistance a la segregation dynamique en presence d'obstacle .

Selon [Latifou Bello] Deux classes d'aptitude a l'ecoulement sont considerees selon l'espacement entre les barres d'armatures lisses comme l'indique le **Tableau II.3** extrait de la norme NF EN 206-9. Les BAPL présentés dans la littérature indiquent un taux de remplissage compris entre 0,75 et 0,90.

Tableau II.3 : Taux de remplisage[104]

Classe	Taux de remplissage
PL1	≥ 0,80 avec 2 armatures
PL2	≥ 0,80 avec 3 armatures

II-5.3.2 à l'état durci :

Les particularités de composition des bétons autoplaçants léger conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées,pour le controler a l'état durci .

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition Plus précisément, le BAPL peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange dépendent alors des de leur retrait et de leur fluage.

II-5.3.2.1 Retrait :

Au cours de la phase "Plastique", le béton connu une première contraction volumique. Après la prise, le béton, qui devient un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait**[14].**
Plusieurs travaux ont comparé le retrait du BAP et celui du BAPL , Nous avons choisi toujours le modelisation de [Étienne LEPESQUEUX] qui il a rapporter dans sa conclusion de chapitre 5 que le type de GL exerce une influence notable sur le retrait endogène et l'augmentation du taux de remplacement des GL a également un effet important sur le retrait endogène.
. D'après ces données, on peut dir que les bétons autoplaçants et les bétons autoplaçants léger possèdent en général un retrait endogène différe . Cependant, les deux types de bétons affichent une différence pour les gammes de résistance élevées (pour les BAP), où le retrait des BAP est supérieur. Au delà d'un an, les BAPL présentent un retrait légèrement supérieur à celui des BAP. Il est vraisemblable que les légères différences entre les retraits des deux types de béton sont dues au volume de pâte qui est plus important dans les bétons autoplaçants .

II-5.3.2 .2 Fluage :

Dans un béton, les granulats sont en général beaucoup moins poreux que la pâte de ciment, c'est la pâte qui constitue la phase poreuse, lieu des contraintes hydriques détaillées précédemment. Considérons maintenant une pâte de ciment visco-élastique. Le comportement visco-élastique signifie qu'à l'application d'une contrainte, la pâte connaît une déformation élastique instantanée, puis, si la charge est maintenue, elle continue de se déformer. Cette déformation différée est appelée déformation de fluage.
De même, à l'application d'une déformation apparaît une contrainte élastique, qui diminue si la déformation est maintenue. On parle alors de relaxation. A l'instar du retrait, il existe plusieurs formes de fluage : fluage propre et fluage de dessiccation. Leurs mécanismes sont complexes, c'est la présence d'eau au sein du réseau poreux qui est au centre de toutes les explications.
Citons par exemple le mécanisme retenu par [Étienne LEPESQUEUX] dans sa modélisation du fluage, il a etudier le fluage en compression sur deux types de déformations (Déformation chargée non scellée) et (Déformation chargée scellée) mettant des epreuvettes cylindriques (150 x 300) de BAP pris comme réfrence et BAPL(avec des taux différent des GL) mesurant Après sept jours de mûrissement humide dans les mèmes conditions (23°C et 50 % HR) et soumis à un chargement pendant un an correspondant à 40% de leur résistance en compression à sept jours.
Il a conclure que l'utilisation de GL a conduit à une augmentation du fluage total (condition non scellées). Ceci peut être dû au module élastique plus faible de GL comparé à celui des GN, ceci

amenant à une plus grande déformation sous une pression de chargement constante. Dans les mélanges fabriqués sans GL, l'incorporation de 20% de SL a entraîné une augmentation de 7% de la fonction fluage total. Le BAPL fabriqué avec un taux de GL de 50% a démontré une fonction fluage total à 6 mois environ 28% supérieure à celle du béton de référence sans GL.. Cependant, l'incorporation de SL ou de GL n'a pas eu d'effets significatifs sur le fluage propre (conditions scellées).

D'après l'éxemple qu'on a pris on peut dir que Le fluage des BAPL augmente significativement lorsque les charges sont appliquées aux jeunes âges, et diminue lorsqu'il s'agit de BAP .

Propriétés du BAPL

Dans cette partie, nous résumons rapidement les différences qui existent entre les propriétés des bétons autoplaçants légers à l'état durci. Elles sont étudiées sous deux aspects, les propriétés mécaniques d'une part et la durabilité d'autre part.

II-6.1 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des bétons légers sont intimement liées aux performances mécaniques et élastiques des granulats légers utilisés (Zhang and Gjørv 1991) et (Arnould et Virlogeux 1986). D'après (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011), les résistances à la compression des BAPL présentées dans la littérature se situent entre 15 et 60 MPa. Par ailleurs, les auteurs indiquent que la résistance à la compression rapportée à la masse volumique réelle sèche des BAPL est positivement corrélée avec le dosage en ciment. (Lo et al. 2007) ont fait une étude comparative de la rhéologie et des propriétés mécaniques entre un BAPL de schiste expansé et un BAPN. Les résultats montrent les propriétés à l'état frais (l'étalement au cône et le T400) des BAPL sont proches de celles des BAPN. En revanche, les auteurs notent que la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAPL sont respectivement de 25 % et 20 % inférieurs aux valeurs du BAPN à dosage de ciment équivalent.

Cette diminution des propriétés mécaniques des BAPL est soulignée par d'autres auteurs (Choi et al. 2006), (Kaszynska 2010) et (Kim et al. 2010). Les valeurs de résistance moyenne à la compression de 20 compositions issues de 12 articles recensés dans la littérature sont présentées à la **figure II.10**. Nous constatons que la résistance moyenne des bétons auto-plaçants légers est comprise entre 30 et 60 Mpa

Cette plage de résistances à la compression correspond à la gamme de résistances utilisée dans l'industrie du béton pour les produits de structure. [104]

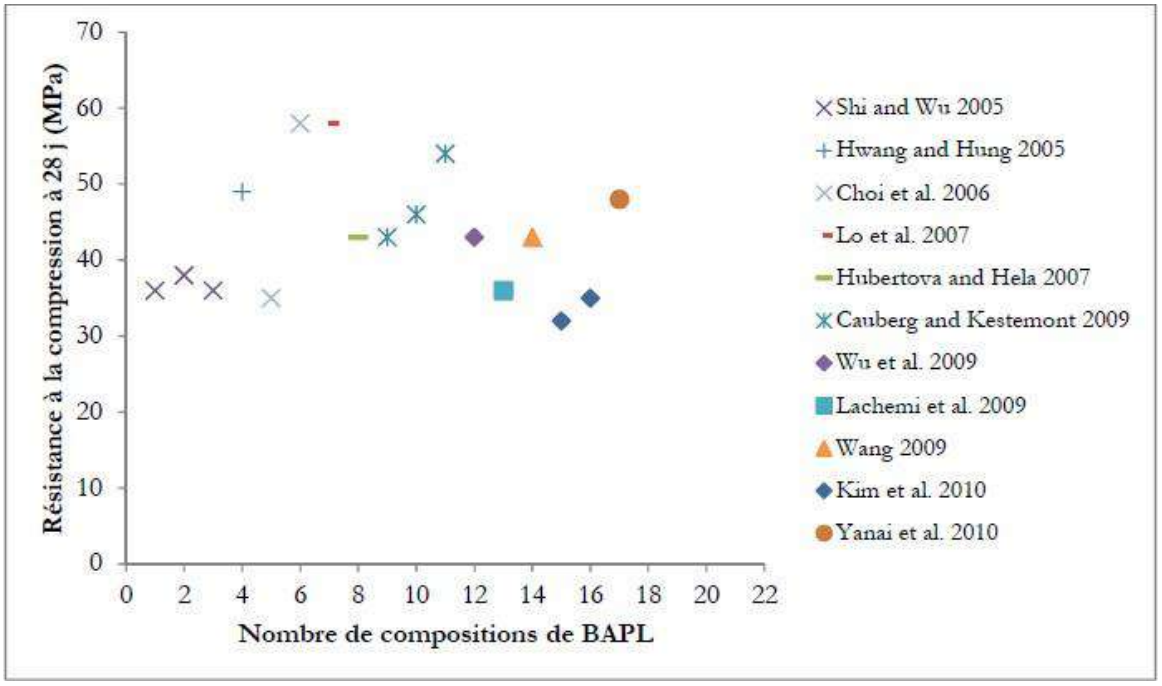


Figure II.10:Résistance moyenne a la compression de BAPL identifiés dans la littérature[104]

Par ailleurs, (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) mentionnent que la masse volumique réelle sèche des bétons auto-plaçants légers se situent entre 1 330 et 1 990 kg/m3 soit une réduction de poids propre entre comprise entre 10 et 40 % comparée à un béton traditionnel de masse volumique réelle sèche de 2 200 kg/m3.

L'introduction de granulats légers dans le béton allège non seulement le matériau mais aussi donne des performances mécaniques proches de celles du béton traditionnel. Cette association de qualité en dépit de la faible rigidité des granulats légers comparée à celle de la matrice cimentaire est en partie liée à la porosité et à l'absorption des granulats légers. Les granulats légers développent des interactions physiques et mécaniques qui favorisent les propriétés à l'interface pâte/granulat et améliorent les propriétés à l'état durci telles que la résistance et la durabilité. [104]

II-6.2.1 Résistance à la compression et la masse volumique

Selon les résultats trouvés par L.Bello, la masse volumique réelle sèche et les résistances moyennes à la compression à 1 et à 28 jours des bétons de sable léger sont présentées au **Tableau II.4** .

La masse volumique réelle sèche des ses formules BS1 (béton sable 1) et BS2 (béton sable 2) est respectivement de 1 350 et 1330 kg/m3 tandis que celle des formules BS3 (béton sable 3) et BS4

(béton sable 4) est respectivement de 1 665 et 1 590 kg/m3. Nous constatons que les BAPLSL (béton autoplacant de sable léger) contenant des granulats d'argile expansée (BS1 et BS2) sont plus légères que les BAPLSL de granulats d'ardoise expansée.

Les résultats sur la résistance à la compression des bétons de sable léger indiquent que la performance mécanique des compositions proposées est proche de l'objectif de 35 MPa. Les aménagements réalisés sur les compositions BS1 et BS3 pour améliorer l'homogénéité du béton ont réduit la résistance à la compression des bétons de BS2 et BS4. La résistance à la compression passe de 40 MPa pour le béton BS1 à 29 MPa pour le béton BS2 et de 62 MPa pour le béton BS3 à 41 MPa pour le béton BS4. La **Figure II.10** montre que la résistance moyenne à la compression à 28 jours augmente lorsque le rapport Eeff/L diminue. (Lo et al. 2007)

soulignent qu'avec un rapport Eeff/L plus faible que 0,3, il est possible de produire des BAPLSL de résistance équivalente à celle des bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) moyennant un dosage conséquent de superplastifiant et d'agent de viscosité.

TableauII.4 : la masse volumique réelle sèche et les résistances moyennes à la compression [104]

Famille	N°	MVR sèche (kg/m³)	fcm,cube (MPa)	
			1 j	28 j
BAPL I	BS1	1 350	23	40
	BS2	1 330	14	29
	BS3	1 665	-	62
	BS4	1 590	17	41

La composition BS1 affiche un résultat intéressant vis-à-vis des objectifs attendus. Ce béton présente une masse volumique réelle sèche de 1 350 kg/m3 et une résistance à la compression à 28 jours de 40 Mpa et la composition BS4 est la plus aboutie des BAPLSL. Ce béton est auto-plaçant et homogène. Il affiche une masse volumique réelle sèche de 1 590 kg/m3 et une résistance moyenne à la compression à 28 jours de 41 MPa. [104]

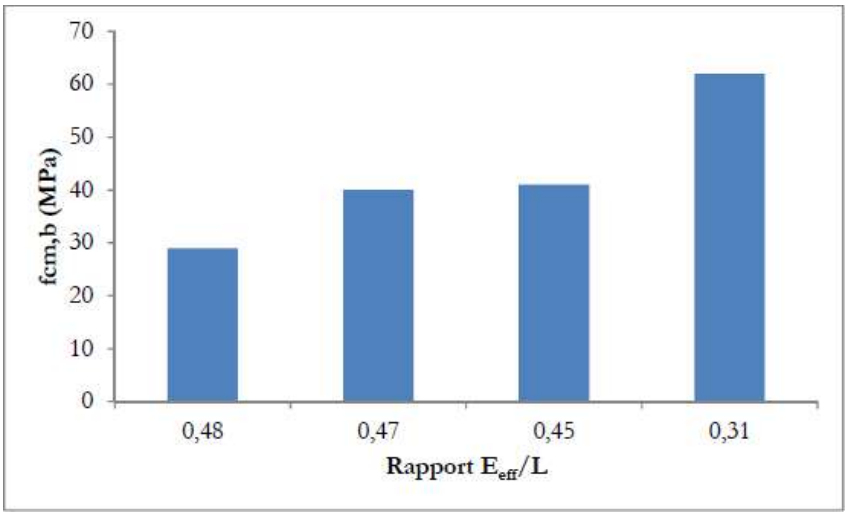


Figure II.11 : la résistance moyenne à la compression

II-6.2.2 Module d'élasticité

Des bétons autoplaçants légers et des bétons autoplaçants à résistance mécanique égale sont testés par Assié.S. Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BAPL. Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAPL est supérieur à celui des BAP. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants légers.
En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

Latifou Bello rapporte que la valeur moyenne du module d'élasticité à 28 jours se situe entre 18 et 30 Gpa pour les BAPL. A résistance équivalente le module d'élasticité des BAPLSN d'ardoise expansée semble légèrement supérieur à celui des BAPLSN d'argile expansée. Ce constat est vraisemblablement dû à la différence de nature entre les types de granulats légers. Les granulats d'ardoise expansée ayant une masse volumique réelle plus grande, ils ont donc un module d'élasticité plus élevé.

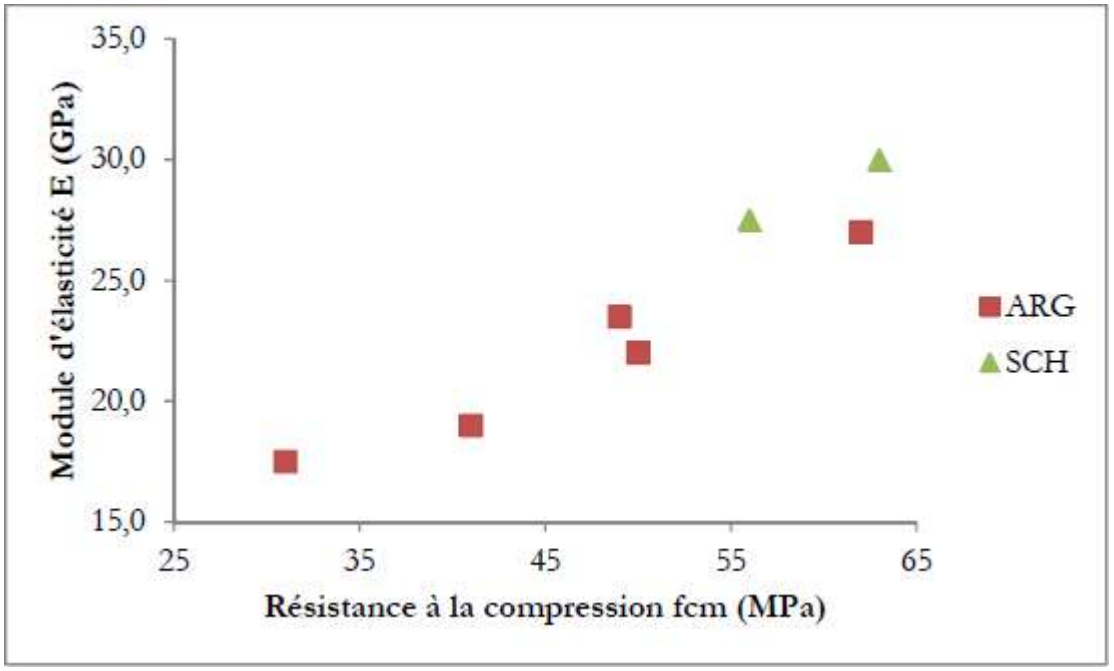
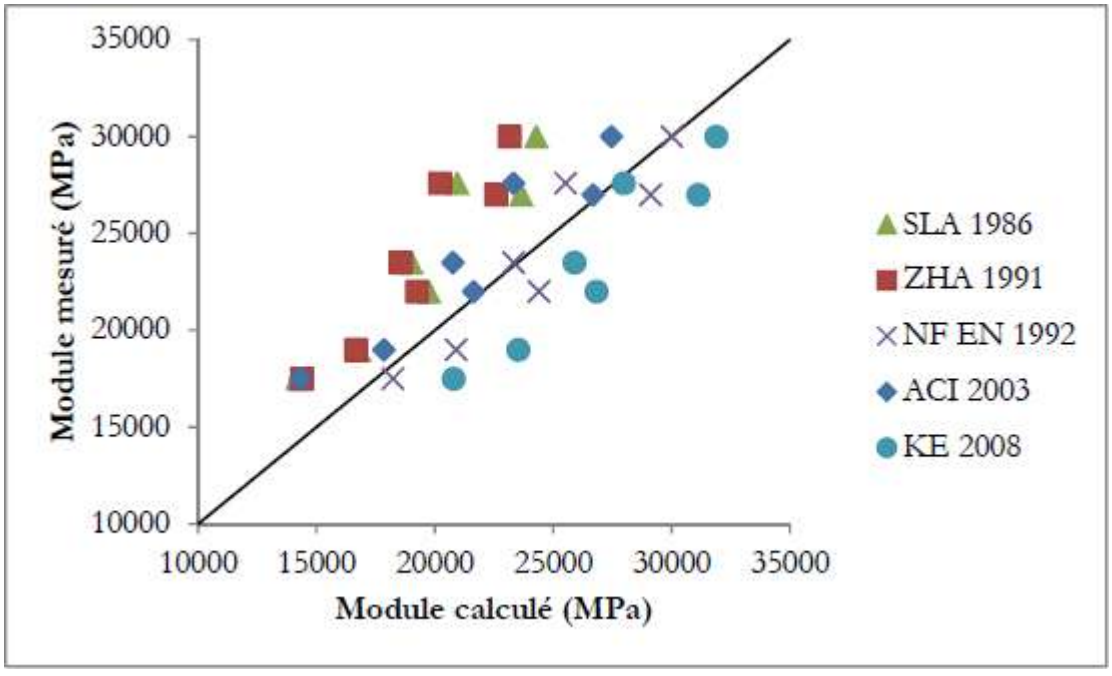


Figure II.12 : Relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression de BAPLSN[104]

La **FigureII.12** montre le rapport entre les données des modèles et les données expérimentales. L'erreur moyenne entre le module mesuré et le module calculé est de 20 %, 23 % 3 % 10 % et 12 % respectivement pour les modèles de (Slate et al 1986), de (Zhang and Gjørv 1991) de la norme (NF EN 1992-1-1), de la norme (ACI 213R- 2003) et de (Ke 2008).[104]



FigureII.13:Comparaison entre les modèles de prédiction du module d'élasticité et les résultats expérimentaux[104]

II-6.2.3 Traction par fendage

A l'université de montpellier la traction par fendage est exécutée sur des corps d'épreuve cylindriques 11*22 cm à 28 et 90 jours d'âge. Un dispositif adapté est intégré à la presse pour réaliser l'essai conformément la norme NF EN 12390-5.



FigureII.14 : Traction par fendage

II-6.2 Propriétés de durabilité

Il existe peu de travaux sur la durabilité des bétons auto-plaçants légers (BAPL). Cependant, l'effet positif de la cure interne apportée par les granulats légers pré-saturés est abondamment cité dans la littérature. La cure interne consiste à substituer partiellement les granulats traditionnels par des granulats légers pré-saturés dans les bétons à faible rapport eau/ciment comme une source d'eau additionnelle afin d'améliorer le degré d'hydratation du ciment dans la matrice durcie. Elle s'effectue pour la plupart sur des bétons de masse volumique normale à faible rapport eau/ciment dans lesquels une partie seulement des gravillons traditionnels est remplacée par des gravillons légers gorgés d'eau. Selon (Maruyama et al. 2009), **(**Bentz 2009) et (Henkensiefken et al. 2009), ce phénomène a des effets positifs sur la fissuration au jeune âge et la durabilité des bétons contenant des granulats légers pré-saturés. [104]

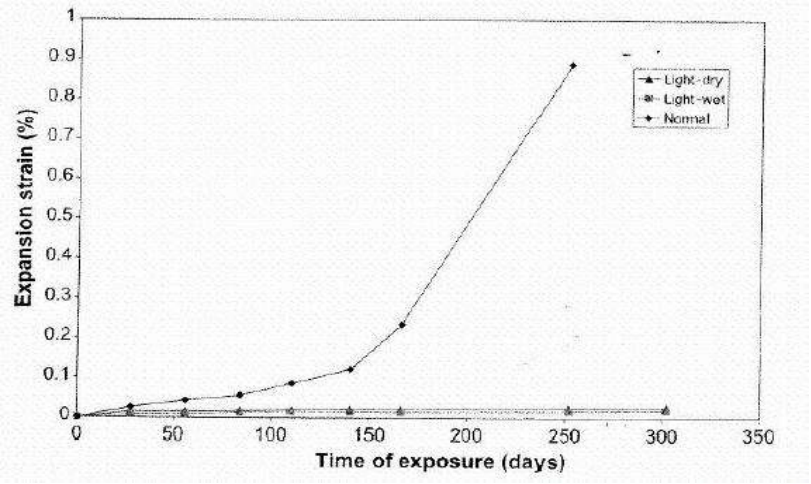
(Philleo 1991) a montré que l'incorporation des granulats légers pré-saturés dans les bétons à très hautes performances (BTHP) permet de réduire la fissuration précoce et par conséquent de limiter

la diffusion et la migration des agents agressifs tels que les chlorures et les sulfates. (Henkensiefken et al. 1991) ont indiqué que la substitution partiellement des gravillons traditionnels par des gravillons légers pré-saturés en eau contribue à améliorer le degré d'hydratation de la matrice et à densifier l'interface autour des granulats légers. Selon les auteurs, cette densification de l'interface pâte/granulat conduit d'une part à une réduction de l'absorption d'eau et de la perméabilité à l'eau et d'autre part, à un accroissement de la résistivité électrique du béton. Les résultats sur l'augmentation de la résistivité électrique des bétons contenant des granulats légers sont confirmés par (Hwang and Hung 2005) dont les travaux ont montré que la réduction de la quantité d'eau de gâchage (quantité d'eau de gâchage comprise entre 140 et 190 l/m3) permet de proposer des bétons auto-plaçants légers (BAPL) avec une résistivité électrique supérieure à 20 kΩ.cm (résistivité électrique sur BAPL âgé de 28 jours comprise entre 30 et 120 kΩ.cm); ce qui limiterait la corrosion des armatures d'après (Buenfeld et al. 1986).

Plus récemment, (Liu and Zhang 2010) et (Paul and Lopez 2011) ont montré que l'incorporation de granulats légers totalement saturés à l'eau réduire de façon significative le retrait total, l'autodessiccation et le retrait endogène au cours du durcissement du béton.
(Bentz 2009) et (Liu and Zhang 2010) conclurent que les effets bénéfiques de la cure interne tels que l'amélioration du degré d'hydratation du ciment et la densification de l'interface pâte/granulat réduisent la profondeur de pénétration des chlorures dans le béton contenant des granulats légers pré-saturés. A titre d'exemple, Les travaux de (Liu and Zhang 2010) montrent que la profondeur de pénétration des chlorures du béton contenant 35 % en volume de granulats légers pré-saturés est de 17,6 ± 0,6 mm tandis que celle du béton traditionnel est de 18,4 ± 1,1 mm. De même, (Bentz 2009) montre que le remplacement de 31 % en volume de sable normal par du sable léger de schiste expansé pré-saturés peut réduire de 25 % la diffusivité du mortier. [104]

Par ailleurs, (Elsharief et al. 2005) montrent que la substitution du sable normal par du sable léger de schiste expansé réduit considérablement l'expansion du mortier comme l'illustre la **FigureII.14** . Ces résultats montrent qu'après 300 jours d'immersion dans une solution de sulfate de sodium (Na2SO4), les corps d'épreuve de mortier de sable léger ne présentent pas d'expansion significative tandis que l'expansion de ceux de mortier de sable normal est proche de 1 %. Les auteurs expliquent ces résultats par la densification de l'auréole de transition autour des grains de sable léger de schiste expansé. Ce constat est confirmé par les travaux de (Liu and Zhang 2010) sur des bétons légers contenant des granulats d'argile expansée. Cependant, il n'est pas possible

de généraliser cette tendance à toutes les compositions de bétons légers car la résistance aux sulfates est intimement liée de la composition chimique du liant.



FigureII.15 : la substitution du sable normal par du sable léger de schiste expansé

Dans le cas des bétons « tout léger » dans lesquels les granulats traditionnels (sable et gravillons) sont totalement remplacés par des granulats légers, le comportement vis-à-vis de la durabilité est défavorable comparé au béton traditionnel. Les travaux de (Haque and Al-Khaial 1999) montrent que la profondeur de pénétration d'eau des bétons « tout léger » est deux fois plus importante que celle des bétons traditionnels testés dans les mêmes conditions opératoires. Ces résultats vont dans le même sens que les conclusions de (Baronio et al. 1996). De même, (Haque and Al- Khaial 1999) montrent qu'à résistance équivalente, le béton « tout léger » se carbonate plus que le béton traditionnel indépendamment des conditions de cure du fait de sa perméabilité plus importante. Ces résultats se traduisent par une pente plus accentuée de la droite de corrélation entre la profondeur de carbonatation et la perméabilité à l'eau du béton « tout léger. Toutefois, les travaux de (Osborne and Al-Khaiat 1995) ont montré auparavant qu'après cinq ans d'exposition à une ambiance atmosphérique normale, la profondeur de carbonatation mesurée sur des corps d'épreuve de bétons « tout léger » et de bétons traditionnels est inférieure à 1mm. [104]

conductivité thermique

Selon (Valore 1980) la conductivité thermique du béton dépend principalement de sa masse volumique réelle sèche. Ainsi, la structure alvéolaire des granulats légers confère au béton léger, une conductivité thermique et une dilatation thermique intéressantes. A titre d'exemple, le béton traditionnel a une conductivité thermique de 1,75 W/m. °C tandis que celle du béton léger d'argile expansée ou de schiste expansé se situe entre 0,50 et 0,80 W/m. °C (Couasnet 2007). [104]

Ce qui confère au béton léger une meilleure isolation thermique. Le coefficient de dilatation thermique d'un béton léger de sable léger est approximativement égal à 80 % de celui du béton de masse volumique normale et s'approche des 100 % lorsque le sable léger est remplacé par du sable naturel (Adrian 1968). Par ailleurs, le béton léger a une bonne tenue au feu en raison de sa faible conductivité thermique et son faible coefficient de dilatation thermique (Abrams and Gustaferro 1968). [104]

Utilisation du BAPL

Les BAPL sont utilisables sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil bien .La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAPL (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, etc.) avec l'exigence de la légèreté du poid.

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

- ✓ densités de ferraillage importantes.
- ✓ formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- ✓ voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.

Et les BAPL sont des matériaux possédant une ouvrabilité très élevée, capables de se mettre en place tout seul, sous leur propre poids et sans moyens de vibration. Ils sont très déformables et épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes ou les sections fortement armées ou restreintes. De tels bétons peuvent augmenter la cadence de coulage et assurer un meilleur fini de surface. [106]

Et on peut le utiliser dans les :

II-8.1 Bâtiment

- **Fondation :**

Puisque les portées seront plus longues et plus larges, les charges sur les fondations seront moins importantes (moins de sollicitation), et de ce fait les fondations pourront être de structure plus simple et économique dans leur dimensionnement.

- **Dalle :**

  Allège le poids propre de la dalle, ce qui entraine une augmentation de la portée entre poutres de cette dernière.

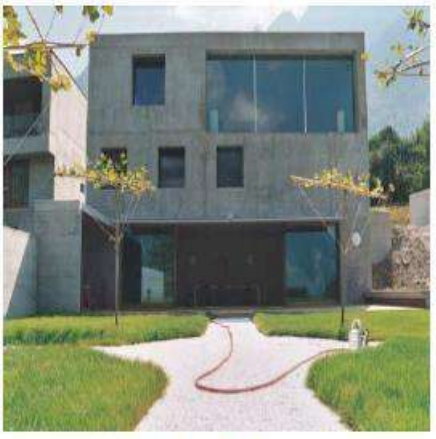
- **Rénovation :**

  La particularité de légèreté de ce béton nous permet de l'utiliser lors de rénovation sans renforcer la structure porteuse existante qu'engendreraient les surcharges d'un béton normal.

- **Isolant :**

  Béton pour mur monolithique, parois et dalle. Il a l'avantage d'être isolant phoniquement et thermiquement. Il est souvent utilisé pour éviter les ponts thermiques dans une construction.





(Maison familiale, Coire, béton isolant Liapor)

FigureII.16 : Coulage de BAP

II-8.2 Génie-civil

- **Ouvrage d'art :**

  Il allège le poids propre de la dalle, ce qui entraine une augmentation de la portée, autant en longueur qu'en largeur.

- **Remblai :**

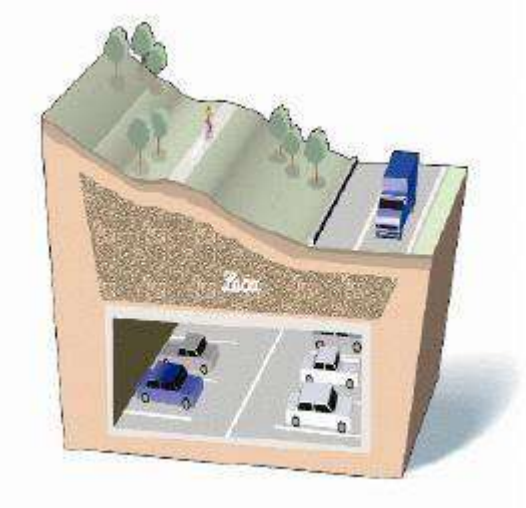
  Les granulats d'argiles expansées permettent de remblayer sur des ouvrages (ex. Parking souterrain) sans alourdir les charges sur ce dernier, ce qui nous permet d'économiser des surépaisseurs de dalles. Nous pouvons aussi les utilisés remblayés derrière un mur de soutènement afin de réduire les poussées sur la construction. Il est aussi employé pour des remblais routiers, autoroutiers et ferroviaires. Ces différents remblais réduisent les tassements différentiels à long terme. Les granulats d'argiles expansées ont aussi des propriétés drainantes.

- **Remplissage :**

  Pour le remplissage d'ouvrage, le béton léger est une bonne solution sans alourdir la charge existante sur les fondations.



(Pont sur la rivière Esla, Espagne)



FigureII.17 : Quelques projet realisés par BAPL

- **Structure maritime :**

  Le béton léger à la propriété de « flotter » si ce dernier est totalement ou partiellement immergé. Nous pouvons l'utilisé pour des plates-formes, des quais, etc.

Avantages et inconvénients

II-9.1 Avantages

Le BAPL est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les cités dans les points suivants :

- Possibilité de produire du béton étanche léger (seulement béton léger à texture fermée)
- Le béton est résistant au gel, dégel et sel (GDS)
- Le béton est résistant au produit chimique (granulats d'argile expansée)
- Il a une faible conductibilité thermique (mur isolant, antibruit)
- Il est résistant à la compression
- Les granulats sont des régulateurs d'humidité
- Sa masse volumique est relativement basse (650 à 2'000 kg/m3)
- Sa résistance aux feux est meilleure qu'un béton normal (seulement béton léger à texture fermée)

II-9.2 Inconvénients

Comme tous les bétons, les BAPL ont aussi des inconvénients, on peut les résumer dans les points suivants

- Le prix est plus élevé à cause du dosage en ciment plus important
- Les fournisseurs sont plus restreints selon le béton léger choisi
- Le prix est plus élevé à cause de l'utilisation de granulats légers, malaxage du béton plus long
- La mise en place est délicate car le béton est plus sensible
- Il est difficile de le mettre en place avec une pompe à béton
- Consommation d'eau plus importante, granulats à porosité importante
- Le module d'élasticité E est inférieur à celui du béton normal




FigureII.18 : Quelques projet realisés par BAPL

II- Conclusion

Les bétons autoplaçants légers sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies. L'objectif de ce travail est de connaitre l'effet de substitution des granulats naturels par des granulats légers sur les performances du béton autoplaçant à l'état frais et a l'état durci.

Le but de ce travail était donc d'éclaircir la réponse de deux questions majeures. Le premiers, es ce qu'on peut combiner entre la légèreté et les exigences physiques et mécaniques de structure, et le deuxième comment faire un béton fluide et léger en même temps sans perdre la résistance des éléments structuraux qui subis plusieurs sollicitations, ainsi d'éviter les problèmes d'exécution lors du gâchage du BAPL.

Chapitre 03 :

Matériaux et essais

III-1 Introduction

Le béton autoplaçant par définition, est un béton très fluide, homogène et stable, qui se caractérise par sa rapidité de mise en place sous l'effet de son poids propre sans apport de vibration externe ou interne.

L'un des problématiques majeures dans le domaine de construction c'est le poids des structures construire en bap pour cela on utilise le bap léger , parmis les bienfaits de BAPL c'est sa légèreté, l'importance de cette derniére est de fournir une amélioration de la capacité de remplissage dans les coffrages les plus étroits ou congestionnés par les armatures, aussi elle réduir le temps de construction et du coût de la main d'ouvré,et bien sur elle fournir une réduction exceptionelle du poids propre, elle participe méme dans l'augmentation de la durabilité,

Dans cette partie on va percevoir les matériaux utilisés pour la confection des composites étudient en compagnie de leurs caractéristiques et les essais nécessaires pour bien cerné les justifications ultérieure des résultats d'essais, nous présenterons par la suite les différents mélanges utilisés dans cette étude et leurs procédures de gâchage, à la fin nous parlerons des essais auxquels les bétons sont soumis.

Matériaux utilisées

Ciment

Un seul type de ciment a été programmé d'utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie (de Mascara) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[107]**.



Figure III.1 : Ciment matine

Définition

MATINE est ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al_2O_3) et le fer(Fe_2O_3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C. En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.
MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico chimiques conforment à la norme NA 442 **[107]**, EN 197-1 **[108]** et à la norme NF P 15 301 **[109].**

Domaine d'utilisation

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, ports, aéroports…etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement…etc.) ;
- Secteur industriel.

Analyse et caractérisation

- **Essais chimiques**

❖ Le tableau résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment

Tableau III.1 :L'analyse chimique du ciment et composition du clinker (Fiche Technique).

Analyse chimique du ciment	**Perte au feu (%) (NA 5042)**	**7.00-9.50**
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfate SO3(%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clinker	Silicates tricalciques C3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalcique C3A(%)	6.00-8.0

▪ Essais physiques

➢ La finesse

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée parla surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[110]**.

➢ La consistance normale

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[111]**.

➢ Le temps de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme

[NF P 15 473] **[112]**. Le tableau suivant résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau III.2 : Essais physiques sur ciment.

Essais	
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	**25.50-28.00**
Retrait à 28 jours (mm/m)	**<1000**
Expansion (mm)	**0.50-2.50**
Début de prise (min)	**120-180**
Fin de prise (min)	**210-280**

- **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme [NF P 15-471] **[113]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge.

Le mortier utilisé est un mortier normalisé : 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont résumés dans le tableau **III**.3.

Tableau III. 3. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.

Age (jours)	Résistance à la compression (MPa)
2	> 20
28	≥ 42.5 et 62.5

III -2.2 Liège expansé

Les grains de Liège Expansé utilisés dans notre étude, ils avaient été fournis par la société JLE EPE Jijel liège étanchéité SPA, son siège social et son unité de production sont situés au niveau de la route de Bejaia BP Jijel 18000 Algérie.



Figure III.2 . Granulats de liège 8/16.

Ce type de granulat est obtenu à partir des chaines de lièges, en passant par le concassement de celles-ci et puis le liège est torréfié dans des autos claves vers 350°c sa densité sèche varie entre 65 et 140 kg/m3.

- ✓ la masse volumique apparente app = 130 Kg/m3
- ✓ la masse volumique absolue abs = 138 Kg/m3.
- ✓ Coefficient d'absorption : WA (%) =33 %.
- ✓ Conductivité thermique 0,040 W/m°k.

III -2.2.1 Domaine d'utilisation

Bétons pour dalles, murs, cloisons, Isolation et allègement des chapes dans la préparation du mortier.

III -2.2.2 Mise en œuvre

A mélanger au ciment ou à la chaux dans l'élaboration du béton. (Produit 100% naturel, obtenu par simple broyage des écorces de liège naturel issues des forêts du Var).

Particularités

Diminue le poids du béton ainsi obtenu nette amélioration de l'isolation aux bruits d'impacts par rapport aux chapes habituelles

Tableau III. 4: La résistance thermique de liège

RÉSISTANCE THERMIQUE

Épaisseur en mm	30	40	50	60	80	100	120	150	180	200
R = m2.°C/W	0,75	1	1,25	1,50	2	2,50	3	3,75	4,5	5

Tableau III. 5: Analyse granulométrique du liège

Tamis, (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisat (%)
16	4.6	0.92	99.08
14	24.7	4.94	95.06
12.5	50.3	10.06	89.94
10	160	32	68
8	388.7	77.74	22.26
6.3	454.2	90.84	9.16
5	465.2	93.04	6.96
3.15	485.7	97.14	2.86
2.5	489.1	97.82	2.18
fond	492.9	98.58	1.42

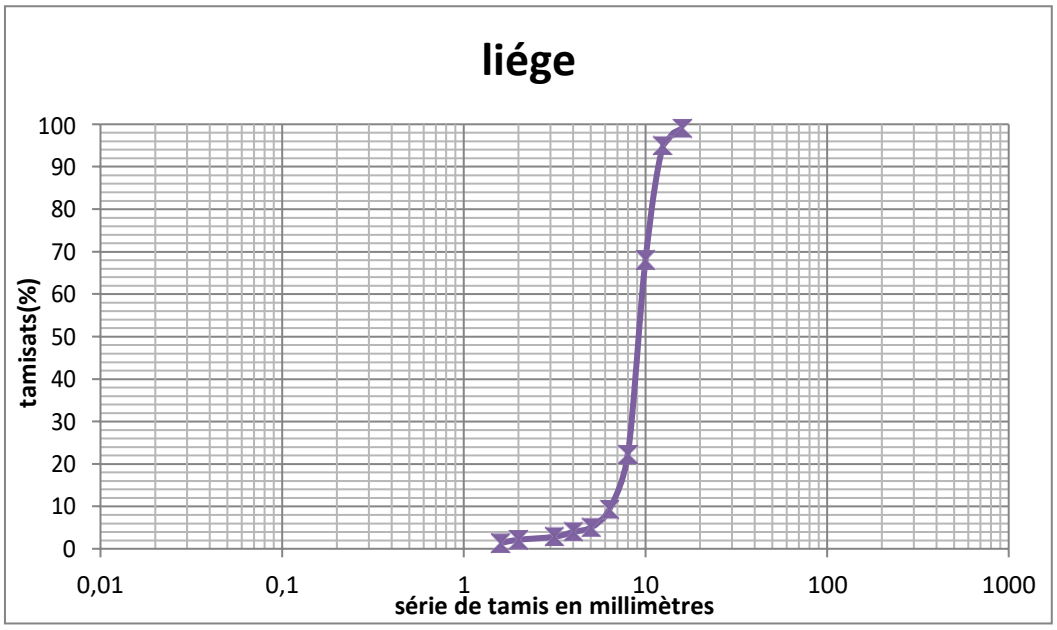


Figure III.3 La courbe d'Analyse granulométrique du liège

III -2.3Sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable D'Oued Souf situé à 500 km au Sud Est de la capital de l'ALGERIE, sa classe granulaire est 0/4 la figure suivant donne un aperçu sur la nature du sable utilisé.



Figure III.4 : Le Sable D'oued Souf

L'analyse granulométrique du sable utilisée est présentée sur (**la figure III.6**) et ses caractéristiques physiques sont affichées dans le tableau ci –dessous

Tableau III. 6 : représente les caractéristiques physiques de sable d'OUED SOUF

Caractéristique	Sable
Classe granulaire	0/4
Module de finesse	2.25
Masse volumique absolue (KG/ m3)	2.65
Masse volumique apparente (KG/ m3)	1.48
La compacité (%)	59
La porosité (%)	41
Equivalent de sable V (%)	82.49
Equivalent de sable P (%)	78.77
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.48

Tableau III. 7 : Analyse granulométrique du sable

Tamis, (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	5.1	5.1	0.51	**99.49**
2.5	18.3	23.4	2.34	**97.66**
1.25	62.5	85.9	8.59	**91.41**
0.63	334	419.9	41.99	**58.01**
0.315	439.4	859.3	85.39	**14.07**
0.16	107.4	966.7	96.67	**3.33**
0.08	25.7	992.4	99.24	**0.76**

III -2.4 Gravier

Le gravier utilisé dans la confection du béton est obtenu, par concassage d'une roche au niveau d'une carrière située à MON GUORNO de la région de berrouaguia (médéa), Algérie. Pour le besoin de cette recherche on a utilisé deux classes de gravier 3/8 et 8/16.

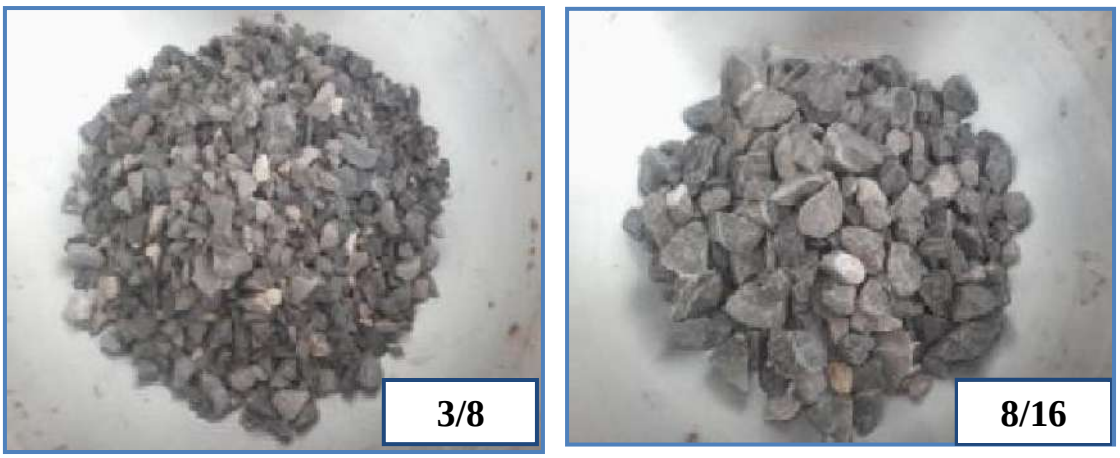


Figure III.5 : Les graviers naturels utilisés.

Tableau III. 8 : Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique gravier

Propriétés	GN 3/8	GN 8/16
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.589	2.640
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.330	1.354
Coefficient los Anglos(%)	25.86	21.5

Tableau III. 9 : Analyse granulométrique du Gravier 3/8

Tamis, (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisat (%)
12.5	0	0	100
10	0	0	100
8	201.7	10.08	89.92
6.3	902	45.15	54.85
5	1183.6	59.18	40.82
4	1153.9	75.69	24.31
3.16	1782	89.1	10.9
2.5	1866.7	93.34	6.66
1.6	1976.7	98.83	1.17
fond	1996.6	99.83	0.17

Tableau III .10 : Analyse granulométrique du Gravier 8/16

Tamis, (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisat (%)
25	0	0	100
20	0	0	100
16	107.6	3.586	96.414
14	340.9	11.363	88.637
12.5	638.6	21.286	78.714
10	1531	51.033	48.967
8	2483.9	82.796	17.204
6.3	2882.7	96.09	3.91
5	2939.2	97.973	2.027
4	2964.4	98.813	1.18
3.15	2971.2	99.04	0.96
2.5	2973.4	99.113	0.887
fond	2990	99.666	0.334

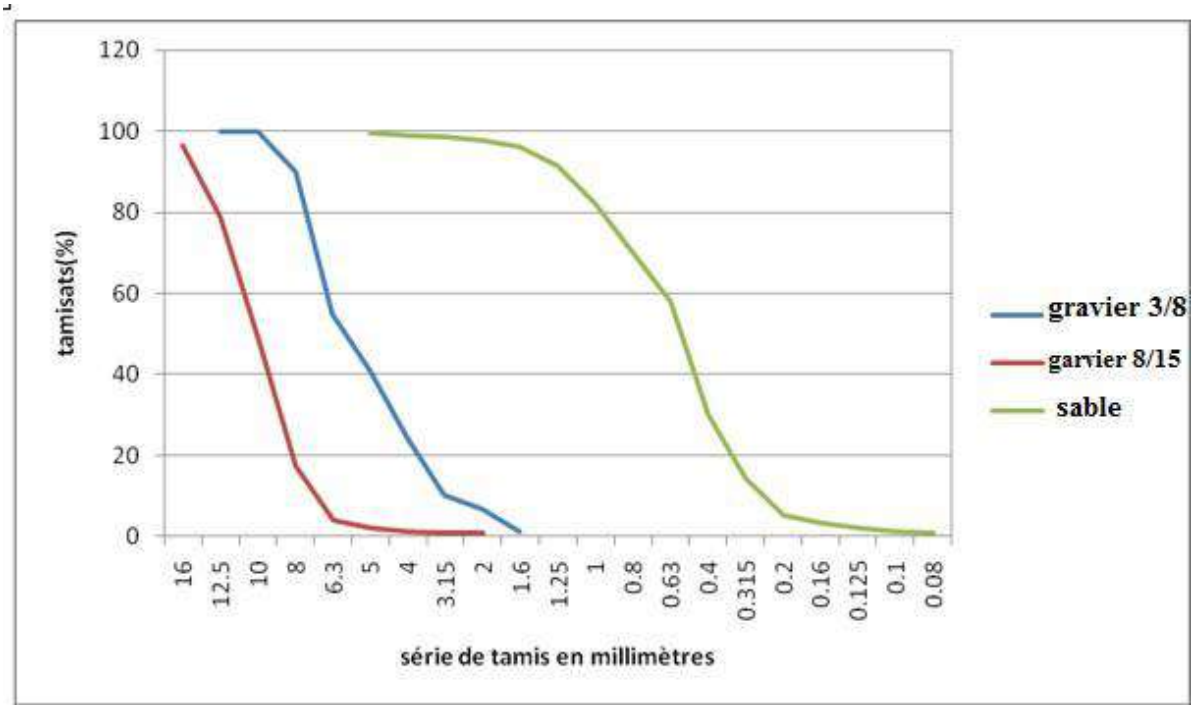


Figure III.6 : Analyse granulométrie de sable -gravier 3/8 – gravier 8/16

III -2.5 Adjuvant

Lors de cette étude nous avons utilisé un super plastifiant nommé MEDAFLOW 30, provenant de GRANITEX-Oued Smar (Wilaya d'Alger), il est conforme aux exigences des normes NFP 18333 et NFP 18336. Ce produit est un réducteur d'eau. II est compatible avec tous les types de ciments. Ses caractéristiques sont présentées au tableau.

Tableau III. 11 : Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLOW 30

Forme	Couleur	Densité	PH	Teneur en chlore
Liquide	jaunâtre	1.18	6 - 6.5	< 1g/I

III -2.6 L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection du béton est celle du robinet de laboratoire de génie civil de l'université de MEDEA. Associé au ciment, l'eau remplit deux fonctions : D'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte., exempte d'impuretés, conforme à la norme [NFP 18-303] **[114]**.

III -3 Formulation

La formulation d'un béton autoplaçant (BAP) est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ses constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP (fluidité et homogénéité). De multiples approches se sont développées á travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. La plupart des méthodes de formulation sont conçues actuellement de manière empirique. Ces méthodes se basent essentiellement sur des approches diphasiques du béton autoplaçant.

III -3.1 Formulation béton autoplaçant témoin

Nous avons commencé par la formulation du béton autoplaçant témoin, donc une mélange composée de gravier, de sable, de ciment, de l'eau de gâchage et le super-plastifiant pour un volume de 27.5L.

Sable = 27.5 kg

Gravier 8/15 =16.23 kg

Gravier 3/8 =8.17 kg

Ciment = 4.13 kg

Eau = eau 1 (70%) + eau 2 (30%) = 4.13 + 1.77 = 5.9 kg = 5.9 L

Super-plastifiant = 112.7 g, [nous ajoutons le SP dans l'eau (30%)]

Et pour m3 ça veut dire 1000L

Sable = 1000 kg

Gravier 8/15 =590.18 kg

Gravier 3/8 =297.09 kg

Ciment = 150.18 kg

Eau = eau 1 (70%) + eau 2 (30%) = 150.18 + 64.36= 214.54 kg = 214.54 L

Super-plastifiant = 4098.1 g, [nous ajoutons le SP dans l'eau (30%)]

Tableau III. 12 : les résultats de la 1er formulation

Constituant (kg)	Formulation 1 pour 27.5L	Formulation 1 pour m3
Sable	27.5 kg	1000 kg
Gravier 8/15	16.23 kg	590.18 kg
Gravier 3/8	8.17 kg	297.09 kg
Ciment	4.13 kg	150.18 kg
eau 1 (70%)	4.13 kg	150.18L
eau 2 (30%)	1.77kg	64.36L
Super-plastifiant	0.1127 kg	4098.1 g

III -3.2 Formulation du béton autoplaçant léger

La formulation du béton autoplaçant léger est basé sur la substitution volumique du granulat usuel par d'autre plus léger. Nous avons choisi le liège comme granulat léger, le gravier a été substitué partiellement par les granulats de liège.

Pour 27.5 L :

Sable = 27.5 kg

Gravier 8/15 =15.69 kg

Gravier 3/8 =6.38 kg

Ciment = 4.1 kg

Eau = eau 1 (70%) + eau 2 (30%) = 4.94 + 2 .16 = 7.1 kg = 7.1 L

Super-plastifiant = 112.7 g , on mettons le SP sur l'eau 2 (30%)

Le liège expansé = 0.592kg

Et pour m3 :

Sable = 1000 kg

Gravier 8/15 =570.54 kg

Gravier 3/8 =232 kg

Ciment = 147.48 kg

Eau = eau 1 (70%) + eau 2 (30%) = 179.63 + 78.54 = 258.18 kg =258.18 L

Super-plastifiant = 4098.18 g , on mettons le SP sur l'eau 2 (30%)

Le liège expansé = 21.52kg

Tableau III. 13 : les résultats de la 1er formulation 2

Constituant (kg)	Formulation 2 pour 27.5 L	Formulation 2 pour m3
Sable	27.5 kg	1000 kg
Gravier 8/15	15.69 kg	570.54 kg
Gravier 3/8	6.38 kg	232 kg
Ciment	4.1 kg	147.48 kg
eau 1 (70%)	4.94 kg	179.63L
eau 2 (30%)	2.16 kg	78.54L
Super-plastifiant	0.1127 kg	4098.18 g
Le liège expansé	0.592kg	21.52kg

III -4 Procédure de malaxage

- ✓ Malaxer le sable, ciment, liège et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange.
- ✓ Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- ✓ Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
- ✓ Malaxer pendant 5 minutes ;
- ✓ Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- ✓ Remalaxer pendant 30 secondes.

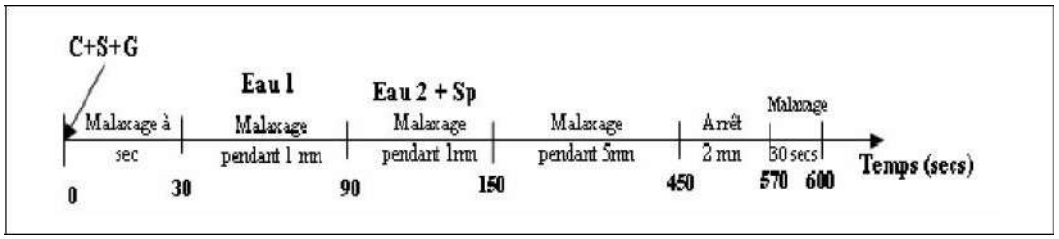


Figure III.7 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant[115]

Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le re-malaxage il se fait juste avant chaque essai.



Figure III.8 : malaxage de BAPL

III -4.1 L'essai d'étalement

L'essai d'étalement ou (slump flow) est utilisé pour caractériser la fluidité d'un béton autoplaçant.

L'équipement nécessaire à la conduite de cet essai est composé des éléments suivants :

- ✓ Un cône d'Abrams
- ✓ Une plaque métallique carrée d'au moins 90 cm
- ✓ Un mètre

Le protocole de mesure adopté est le suivant :

1. Humidification du cône et de la plaque métallique

2. Remplissage du cône par le BAP préparé

3. Arasage de la surface du cône et soulèvement vertical

4. Mesure de l'étalement le diamètres de béton



Figure III.9 : L'essai d'étalement ou (slump flow)

Le tableau suivant résume les résultats de l'éssai de cône d'Abrams :

Tableau III. 14 : résultats de slump flow

D1	béton témoin	700 mm
D2	béton autoplaçant léger	790 mm

On peut constater que les bétons autoplaçants témoin respectent le critère d'étalement (compris entre 60 et 75cm). On a pu observer aussi que la ségrégation à la périphérie des galettes de bétons était absente ou très faible. Sur la consistance du bétons autoplaçants témoin ; aucune condition n'avait été fixée au préalable. L'affaissement obtenu est de classe SF2 : (étalement compris entre 660 et 750 mm).

Mais concernant le béton autoplaçant léger on a trouver un etalment de 790 mm ce que nous a permis d'observer une ségrégation au niveau du galatte de béton et quelque non homogénieté entre les granulats de liége et le gravier ce béton a une affaissement de classe SF3 : (étalement compris entre 760 et 850 mm).

III -4.2 L'essai a l'entonnoir en V (V-Funnel)

Essai à l'entonnoir en V permet d'évaluer la mobilité en milieu confiné Cet essai est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute, après on mesure le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice, en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. [116]

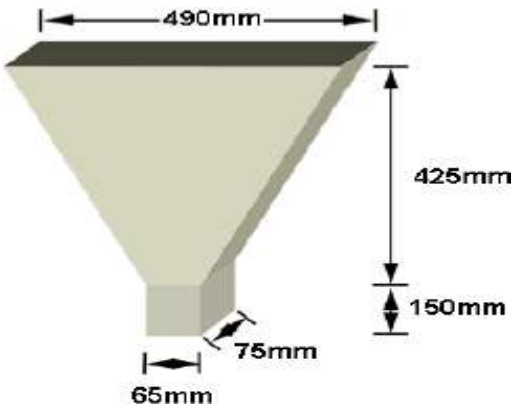


Figure III.10 : L'essai V-funnel

Tableau III. 15 : résultats de L'essai V-funnel

t1 de **béton témoin**	4s
t2 de **BAPL**	12s

On a mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé . Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant.Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 4 et 12 secondes est recommandé pour le béton BAP. Pour notre BAP témoin on a trouver un temps d'écoulement qui égale a 4 secondes et pour le BAPL 12 secondes ,ceci nous a permis de dire que les résultats obtenus sont largement satisfaisant .

III -4.3 L'essai de la boîte en « L »

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

Mode opératoire :

- ✓ Vérifier que la boite est sur un plan horizontal.
- ✓ Remplir de béton la partie verticale de la boite en L.
- ✓ Araser et laisser le béton reposer pendant 1 minute.
- ✓ Enlever la trappe et laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boite à travers le ferraillage

- ✓ Quant le béton se stabilise, on mesure la dénivelée soit les hauteurs Hl et H2. On exprime le rapport **H2 /H1.** Ce rapport doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe de blocage ou de ségrégation. [117]

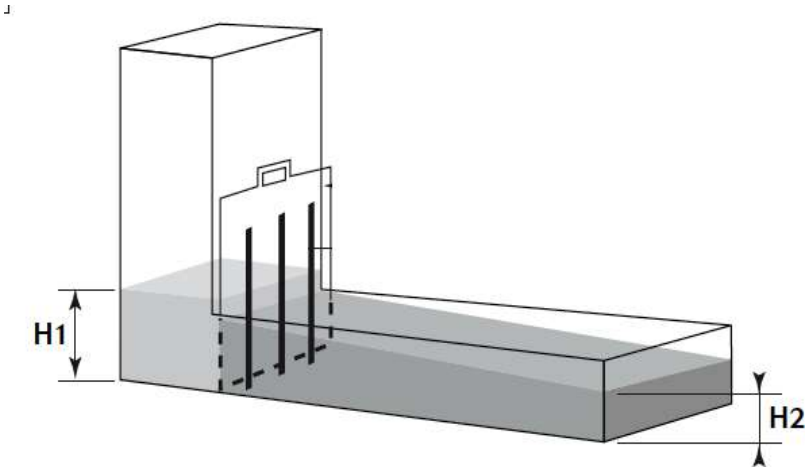


Figure III.11 : Essai de boite en L

Tableau III. 16 : Les résultats Essai de boite en L

Béton témoin	**H2/H1= 0.9**
BAPL	**H2/H1= 0.75**

On remarque que la capacité de remplissage requise pour les BAPL n'est pas atteinte, elle doit normalement dépasser les 80%. Dans notre essai on a la trouver environs les 75% (H1/H2=0.75) Ceci dit, vu que l'étalement horizontal était correct, mais le chiffre obtenus dans cette essai n'est pas stafaisant . On peut les expliquer par rapport au fait que la boîte métallique utilisée présentait un état de rouille avancé. D'ailleurs, lors de l'essai, l'écoulement était assez difficile et une grande partie des BAPL adhérait aux parois de la L BOX. Toute fois, le résultat obtenu pour le BAP témoin est supérieure des 80%

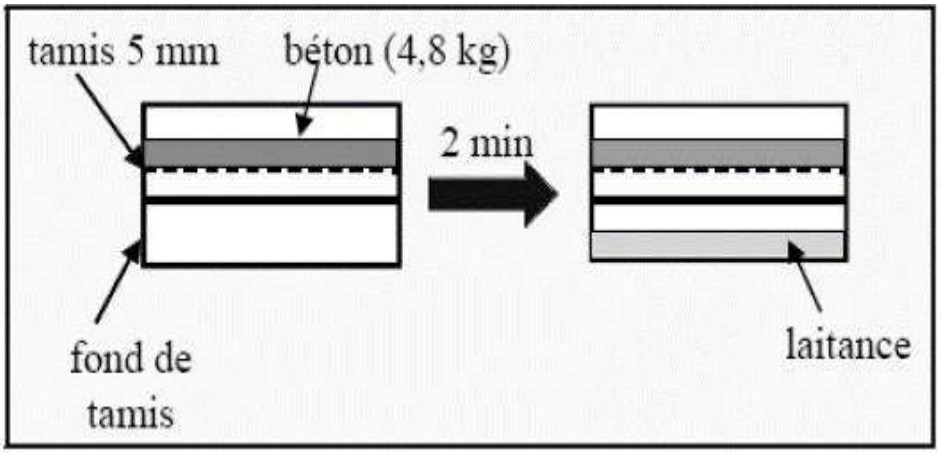
recommandées, ce qui est satisfaisant.

III -4.4 L'essai de stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis 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 (noté PLAITANCE par la suite) d'un échantillon de béton (4,8 ± 0,2 kg) passant à travers un tamis de 5 mm

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes:

- ✓ 0% < PLAITANCE < 15% : stabilité satisfaisante,
- ✓ 15% < PLAITANCE < 30% : stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- ✓ PLAITANCE > 30% : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable). [118]



✓

Figure III.12 :Essai de stabilité au tamis

Tableau III. 17 : résume les résultats de l'éssais

Béton témoin	**7.98%**
pour le BAPL	23.7%

Notre béton autoplaçant a présenté une bonne stabilité au tamis, pas de ségrégation statique une laitance qui égale a 7.98%, elle est située dans le domaine des BAP, soit inférieure à 15 %. Stabilité satisfaisante, béton homogène et stable. Cette stabilité est assurée d'une part, par l'importante quantité de mortier (sable+ciment) que contient le béton autoplaçant et d'autre part, par la nature de matériau utilisée. Pour les BAPL on à trouver une laitance égale a 23.7 % cela nous indique que la laitance est en ségrégation critique.

III -5Conservation des éprouvettes

Après homogénéisation du matériau frais, celui-ci est mis en place dans des moules de dimensions de 10x10x10mm, 7 x 7 x 28 mm, de 10 x 10 x 40 et de 16 x 32 mm conformément à la norme NF P.18-400. Pour chaque essai, juste après la confection des éprouvettes et afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique ils ont été couvertes par une toile en plastique. Après 24heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans des bacs remplis d'eau à 20±2°C et à l'air libre selon la nature de l'essai, jusqu'au moment de l'essai programmé.

III - Conclusion

Cette partie expérimentale avait pour but de caractériser les bétons autoplaçants et les bétons autoplaçants légers à l'état frais, Dans ce contexte, plusieurs formulations de BAP et de BAPL ont été mises au point, à partir de matériaux identiques. Ainsi, la composition des mélanges et les procédures de mesure va nos permettre de mieux analyser les résultats et faciliter la compréhension de l'influence de différents paramètres étudiés dans notre mémoire.

Conclusion générale

Les structures en BAPL présente des intérêts architecturaux et énergétiques importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections où la réalisation d'éléments de forme complexe d'une part. D'autre part, ils minimisent le bilan énergétique. Donc, les BAPL présentent un alternatif particulièrement intéressant au béton dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation.

L'objectif de ce travail était donc d'élaborer un béton autoplaçant léger a travers la valorisation du liège expansée, nous avons essayé de couvrir deux principaux volets, le premier écologique, et le deuxième technologique en élaborant un granulat artificiel léger permettant de donner au béton autoplaçant une bonne performance et surtout une légèreté tout en préservant ces caractéristiques physico-mécaniques. Ainsi le liège a été introduit aux mélanges de béton autoplaçant par substitution volumique des granulats à différents pourcentages. Un super-plastifiant de type réducteur d'eau a été utilisé.

Les éprouvettes élaborées en béton et en bétons légers ont été composés pour but de faire une étude approfondie sur leurs comportements et leurs propriétés. Malheureusement cet objectif n'a pas été atteint à 100%. Parce qu'on n'a pas pu terminer le travail au laboratoire à cause du confinement sanitaire imposé par l'État après la diffusion massive de la pandémie du Covid-19. Néanmoins, nous avons arrivé à évaluer certains critères des BAP et BAPL à l'état frais, alors nos constats sont notamment les suivants:

- A l'essai de fluidité au cône d'Abrams, le BAP et le BAPL s'étale et forme une galette dont le diamètre dépasse les 500 mm.
- Le diamètre d'étalement d'un BAP diminue avec la diminution du rapport E/L ce qui influe positivement sur la stabilité et la résistance à la ségrégation.
- L'obtention d'un béton autoplaçant nécessite l'utilisation d'un super-plastifiant haut réducteur d'eau, qui lui permettre de diminuer le rapport E/L.

- La comparaison entre les formulations de béton autoplaçant et béton autoplaçant léger à montrer que les bétons autoplaçants léger seraient plus fluide.
- Une remarque pourrait être faite sur les performances obtenues par les bétons autoplaçants légers. Au vu des exigences requises pour l'élaboration d'un tel type de béton, il est visible que l'on obtient de bons bétons à base de liège expansé en termes de performances, à l'état frais .Mais il est clair qu'en essai LBOX , on obtient des résultats moins satisfaisants à cause de la difficulté de faire homogénéiser deux granulats qui ont deux masses volumiques différentes et aussi les conditions de réalisation de cette essai au laboratoire, et nous avons pu obtenir des résultats mieux que l'on a eu si en améliorant les conditions de travail

En finalité, les BAPL à base de liège expansé peuvent être élaborés à partir des mêmes règles qui s'appliquent aux bétons autoplaçants, en ce qui concerne leurs comportements à l'état frais. Malgré certaines difficultés rencontrées, les essais effectués dans cette étude constituent un pas en avant dans l'approfondissement des connaissances sur les propriétés des bétons autoplaçants léger à base de liège étant donné qu'il n'y a presque pas d'études faites sur ce sujet.

En perspectives, des études complémentaires plus approfondies doivent être engagées afin de bien connaitre et comprendre le comportement des BAPL à base de liège vu sa disponibilité à notre pays. Il serait intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux économiques (d'autres sources de granulats, de ciment, d'adjuvants…). Enfin, le développement du béton auto-plaçant en Algérie n'en est qu'à ses débuts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

[1] Okamura H., Ouchi M., Self-compacting concrete, development, present use and future, in: A. Skarendahl, O. Petersson (Eds.), Self-Compacting Concrete, RILEM Symposium Stockholm, RILEM Publications, 1999, pp. 3 – 14

[2] Okamura H., Ouchi M., Self-compacting concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, N°1, 2003, pp. 5 – 15

[3] benchaa benabed THESE DE DOCTORAT « Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons autoplaçants »,UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT, juin 2011

[4] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. «*Self-compacting concrete*». Structural Concrete, 17, March 2000.

[5] ZEMIRLINE Soulef MÉMOIRE de MAGISTER «ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES ET MÉCANIQUES D'UN BÉTON FLUIDE (AUTOPLAÇANT) » ,universite yahya fares, médéa ,juin 2008 .

[6] Okamura et Ouchi, «*Self-compacting concrete*», Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp 5-15.

[7] Okamura. H, and M. Ouchi, «S*elf Compacting Concrete: Development, present use and future*», In self compacting concrete: Proceedings of the first international RILEM symposium, A. Skrendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan, France, 1999.

[8] Ozawa. K, et al. «*Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures*», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

[9] yagoub mohamed ,mémoire de MAGISTER « évaluation de la qualité du béton de fibre in situ cas de béton autoplaçant avec des fibres mixtes » , université mohamed khider ,biskra, juin 2009

[10] KATEB Mohamed Lamine , MEMOIRE de MAGISTER « formulation des bétons autoplaçants à base de laitier » UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE « HOUARI BOUMEDIENE » alger ,juiellet 2006 .

[11] Khayat K., «Les bétons autonivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation », p 479483, Eyrolles, 1997.

[12] mohamed rissel khalifa , thése de doctorat «Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants » , université d'orléans et universite de constantine , juin 2009

[13] Haddad O., 1er congres international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24, 25 et 26 Mai 2004.

[14] Abib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, le 06 Juillet 2006.

[15] Sedran T., Thèse de Doctorat en Structure et Matériaux, « Rhéologie et rhéomètrie des bétons - Application aux bétons autonivelants », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Nantes, le 08 Mars 1999.

[16] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.

[17] Ecoles Française du Béton (EFB), mis en ligne par le lycée du Bâtiment Saint- Lambert, Internet, 2004.

[18] Seddik A. Thèse de magistère en Génie Civil, « Le béton autoplaçant sous conditions locales », Département de Génie Civil, Université de Sétif (Algérie), Févier 2008.

[19] Béton autoplaçant – wikipédia en ligne, www,wikipédia,org, 2008.

[20] Net, www.termsciences.fr, 2008.

[21] G.Dreux, J.Festa, «*Nouveau Guide du Béton et Ses Constituants* », 8ème Edition, Edition Eyrolles.1998.

[22] Baron J., Ollivier J.P., « *Les bétons – Bases et données pour leur formulation* », Editions Eyrolles, 1996.

[23] Daoud Atef, «*Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant-contribution à la modélisation numérique de l'interface* », Thèse de Doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, Juin 2003.

[24] Holcim, « *Le béton autocompactant* », Version 26-11-2004.

[25] Bucchi, R. (1986) «*Aperçus sur les ajouts et les ciments composés du point de vue de l'industrie*», 8eme congrès de chimie des ciments, Rio de Janeiro, pp. 185-198.

[26] M. Saric - Coric «*Interactions Superplastifiant – Laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton*», Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, (2001)

[27] Aïtcin, P.C. « Bétons à Haute Performance ». Edition Eyrolles, 2001.

[28] M. Saric-Coric, P. Aïtcin, «*Béton à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice* », Canadien Journal of Civil Engineering 30, pp. 414-428 (2003).

[29] K. Manai. « *Étude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants* » Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke. (1995).

[30] Rouis. F., «*Formulation et Propriétés Mécaniques des Bétons Autoplaçants à Base de Laitier de Haut Fourneau*», Thèse de Magister, Centre universitaire YAHIA FARÈS de Médéa

[31] Journée d‟Information sur les Ciments, les Bétons et les Adjuvants, «Les adjuvants, définitions et opportunités d‟utilisation», ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.

[32] Comparet C., Thèse de Doctorat en Chimie - Physique, «Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d‟un ciment Portland et des superplastifians du béton», Université de Bourgogne – UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot, le 8 Octobre 2004.

[33] Khayat K.H., « *Viscosity-Enhancing Admixtures for cement-based materials - An overview* » Cement and Concrete Composites, 20, pp. 171-188, 1998.

[34] A. Tagnit-Hamou, « *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons* », Note de cours GCI 712, Université de Sherbrooke, Canada, 2001.

[35] NF EN 1008 « Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement : P18-211) », Juillet 2003.

[36] Pr : Othmane BOUKENDAKDJI, THESE DE DOCTORAT D'ETAT « ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT : OPTIMISATION DES CONDITIONS OPÉRATOIRE » UNIVERSITE SAAD DAHLEB ,blida, 2010

[37] König G., Dehn F., Weise F. and Hertel C. "Applications of ready-made binders for self-compacting concrete (SCC)" Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete , Japan, 2001, pp. 361-367

[38] Jin, "Properties of mortar for self compacting concrete", Thèse de l'Université de Londres, 2002.

[39] Ouchi.M , Edamatsu.Y, "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete", In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Stockholm,1999.

[40] –Loukili.A, Turcry.P, "Effect of a viscosity agent on mechanical properties of self-compacting concrete", In proceeding of Conference ICPCM A new era of building, 18-20 February 2003.

[41]- Ozawa.K, Maekawa.K, Okamura.H, "High performance concrete with high filling capacity", Proceedings of RILEM International Symposium on Admixtures for Concrete: Improvement of Properties, Barcelone, pp. 51-, 1990.

[42]- Okamura.H, Maekawa.K, Ozawa.K, "High performance concrete", First ed. Gihouda Publishing Co, Tokyo, 1993.

[43]-Okamura.H, Ozawa.K, "Mix design method for self-compacting concrete",Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, 1995.

[44]- Okamura.H, Ouchi.M, "Self-compacting high performance concrete", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol1, 1998

[45]- Skarendahl.A , Petersson.O, "Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Commite 174-SCC", RILEM Publications, France, 2001.

[46] -Mme BENAKLI SARAH , Mémoire de Magistère «Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction » UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2007.

[47]- Petersson.O, Billberg.P, Van.B.K, "A model for self-compacting concrete", Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, Ecosse, 1996.

[48]-Petersson.O, Billberg.P, "Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler",Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.

[49]- Billberg.P, "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2: 99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999.

[50]- Ozawa.K, Tangtermsirikul.S, Maekawa. K, "Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete", Proceedings of the 4th CANMET/AI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turquie, pp. 121-137, 1992.

[51]-Van.B.K., "A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete", MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1994.

[52]- Tangtermsirikul.S, Van.B.K, "Blocking criteria for aggregates phase of Selfcompacting high performance concrete", Proceedings of Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering, Bangkok, pp. 58-69, 1995

[53]-Bui .V.K, Akkaya .Y, Shah .S.P, "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre2002.

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

[55]- De Larrard.F, Sedran.T, "Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 32, 11, pp. 1699-1704, 2002

[56] -Jean-christophe Braquenier, « *Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant* », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[57] TALEB MOUNIR ,mémoire de MASTER « optimisation de la pate d'un béton autoplaçant (BAP) à base d'ajouts cimentaires locaux », universite M'HAMED BOUGARA ,boumerdes 2017

[58] hanaa FARES , these de doctorat « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés `a une température ´élevée » Ecole Doctorale Sciences et Ing´enierie Universit´e de Cergy-Pontoise , Décembre 2009.

[59] Le Roy R., De Larrard F., Pons G., Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances, Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, mai 1996, pp.63 – 84

[60] De Larrard F., Concrete mixture-proportioning - A scientific approach, Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999, p. 448

[61] Pera J., Husson S., and Guilhot B., Influence of finely ground limestone on cement hydration, Cement and Concrete Composites, 21, 1999, pp. 99 – 105

[62] Gibbs J.C., Zhu W., Strength of hardened self-compacting concrete , Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO7), Stockholm, Sweden, 1999, pp. 199 – 209

[63] Sonebi M., Bartos P.J.M., Hardened SCC and its bond with reinforcement, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Edited by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 275 – 289

[64] Petersson Ö., Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001, pp. 277 – 284

[65] Felekoglu B., Yardimci M.Y., Baradan B., A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 446 – 456

[66] Shi C., Wu Y., Shao Y., Riefler M., Comparison of two design approaches for selfconsolidating concrete, First North American Conference on the Design and Use of SelfConsolidating Concrete, ACBM center, 2002, pp. 313 – 319

[67] Petersson Ö, Gibbs J., Bartos P., Testing of SCC: A European Project, 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 299 – 304

[68] Klug Y., Holschemacher K., Comparison of the hardened properties of selfcompacting concrete and normal vibrated concrete, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 596 – 607

[69] Guneyisi E., Gesoglu M., A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag, Materials and Structures, 41, 2008, pp. 479 – 493

[70] Choi Y.W., Kim Y.J., Shin H.C., Moon H.Y., An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, 36, 2006, pp. 1595 – 1602

[71] Persson B., A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and Concrete Research, 31, 2001, pp.193 – 198

[72] Pons G., Proust E., Assié S., Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 645 – 645

[73] Klug Y., Holschemacher K., Material properties of hardened self-compacting concrete, ICPCM – A new era of building, Cairo, Egypt, 18-20 February 2003.

[74] Proust E., Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002, p. 230

[75] Mortsell E., Rodum E., Mechanical and durability aspects of SCC for road structures, Proceedings **of** 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001, pp. 459 – 468

[76] Vieira M., Bettencourt A., Deformability of hardened SCC, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 637 – 644

[77] Acker P., Sur les origines du retrait et du fluage du béton, Revue Française de Génie Civil, Vol. 7, 2003, pp. 761 – 776

[78] Assié S., Escadeillas G., Marchese G. and Waller V. « Durability properties of lowresistance self-compacting concrete » Magazine of Concrete Research, 2006, vol 58, pp. 1–7.

[79] Hou W.M., Chang P.K., and Hwang C.L. « A study on anticorrosion effect in highperformance concrete by the pozzolanic reaction of slag » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 615–622.

[80] Zhu W., Quinn J., Bartos P.J.M., " Transport properties and durability of selfcompacting concrete ", Proceedings of 2nd International Symposium on SelfCompacting Concrete, Tokyo, Japon, 2001, pp. 451-458.

[81] De Schutter G. and Audenaert K. « Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration » Materials and Structures / Mattriaux et Constructions, Vol. 37, November 2004, pp. 591-596

[82] Dinakar P., Babu K.G. and Santhanam M. « Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes » Cement & Concrete Composites, 2008, vol 30, pp. 880–886.

[83] Perraton D., Aitcin P.C. et Carles-Gibergues A., « Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999, vol 221, pp. 69-78.

[84] Trägårdh J. "Microstructural features and related properties of selfcompacting concrete", Proceedings of First International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.175-186.

[85] De Schutter G., Audenaert K., Boel V., Vandewalle L. et al, "Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a Belgian research project" Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp.799-807.

[86] Assié S. « Durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Octobre 2004, 249 pages

[87] Tang L., Andalen A., Johansson J.O. and Hjelm S. " Chloride diffusivity of selfcompacting concrete ", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.187-198.

[88] Rougeau P., Maillard J.L. and Mary-Dippe C., "Comparative study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction", Proceedings of First International RILEM Symposium on SelfCompacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp. 251-261.

[89] Attiogbe E.K., See H.T. and Daczko J.A. "Engineering properties of selfconsolidating concrete", First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, Novembre 2002, pp. 371-376

[90] Trägårdh J., Skoglund P. and Westerholm M., "Frost resistance, chloride transport and related microstructure of field self-compacting concrete", Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 881-891.

[91] Güneyisi E., Gesoglu M., Özturan T. and Özbay E. « Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age » Construction and Building Materials, 2009, vol 23, pp. 469–481.

[92] Ramachandran V.S., Malhorta V.M., Jolicoeur C. et Spiratos N. « Superplasticizers : Properties and applications in concrete » Materials Technology Laboratory, CANMET, Canada 1998.

[93] Dreux G. et Festa J. « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Edition Eyrolles, 1998

[94] Khayat K.H. and Assaad J. "Air-void stability in Self-Consolidating Concrete" ACI Materials Journal, 2002, V99, N°4, pp. 408-416.

[95] Persson B. "Internal frost resistance and salt frost scaling of Self-Compacting Concrete" Cement and Concrete Research, 2003, vol 33, pp. 373-379.

[96] Hans-Erik G. and Pentti P. "Properties of SCC- especially early age and long term shrinkage and salt frost" Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete 1999 in Sweden, pp. 211-225.

[97] Lang E. and Geiseler J.F. « Use of Blastfurnace Slag Cement with high slag content for high-Performance Concrete » Radical Concrete Technology, Edited by R.K.Dhir and P.C.Hewlet, Published in 1996 by E & FN Spon, London, pp. 67-76.

[98] Bassuoni M.T. and Nehdi M.L. « Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments andflexural loading » Cement and Concrete Research, 2009, vol 39, pp. 206–226.

[99] Sandrine BETHMONT, THESE DE DOCTORAT « MECANISMES DE SEGREGATION DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS (BAP) » l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ,france 2005

[100] Walraven « Structural aspect of self-compacting concrete » proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp. 15-22.

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

[102] 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.

[103] Ouvrages en béton autoplaçant – wikipédia en ligne, www,wikipédia,org, 2008.

[104] Latifou BELLO. Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto

plaçants légers et durables Thèse de doctorat université Montpellier 2

(Arnould M. et Virlogeux M.) (1986) Granulats et Bétons Légers

Édition 1986, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées

(Tang et al. 2011) Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry**.***Cement & Concrete Composites 33 (2011) 292-300*

(Chen et al. 2012) Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments **.***Construction and Building Materials 28 (2012) pp. 387-394*

[105] http://www.guidebeton.com/beton-autoplacant

NF EN 206-1/CN : Béton Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité

Décembre 2012, Afnor

[Étienne LEPESQUEUX**]**. Comportement des bétons autoplacants préparés avec des granulat mégers université de Sherbrooke

[Kim et coll. 2010] "Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates", Construction and Building Materials, 24,2010, ppl 1-**16.**

[Choi et coll. 2006] "An experimental research on the fluidity and

mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete", Cernent and Concrete Research, 36,2006, ppl 595-1602.

(Zhang and Gjørv 1991) Characteristics of lightweight aggregate for high strength .*To be published in ACI Materials Journal 1991; 88(2): pp. 150-158*

(Arnould et Virlogeux 1986) Granulats et Bétons Légers
Édition 1986, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées

(Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art & Pumice Application
Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 9 n°.1 pp. 15-29; 2011
(Kaszynska 2010) Effect of aggregate mix composition on lightweight self-consolidating concrete.*International Rilem Conference on Self Compacting Concrete. Canada 2010, pp. 203-210*

(Maruyama et al. 2009), Evaluation of water transfer from saturated lightweight aggregate to cement paste matrix by neutron
Radiography.*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 605 pp. 159-162*

(Bentz 2009) Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in motars
Cement & Concrete Composites 31 (2009) 285-289

(Henkensiefken et al. 2009) Volume change and cracking in internally cured mixtures made with satured lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions.*Cement & Concrete Composites 31 (2009) pp. 427-437*

(Philleo 1991) Concrete science and reality .*Materials Science of Concrete II; 1991 (Skalny J. and Mindess S.). American Society, Westerville, OH*

(Hwang and Hung 2005) Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete
Construction and Building Materials 19 (2005) 619-626

(Buenfeld et al. 1986). The resistivity of mortar immersed in seawater.

Cement and Concrete Research 16 (41) (1986) pp. 511–524

(Liu and Zhang 2010) Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration
Cement & Concrete Composites 32 (2010) pp. 757-766 – 2010

(Paul and Lopez 2011) Assessing Lightweight Aggregate Efficiency for Maximizing Internal curing Performance
ACI Materails Journal, V. 108, N. 4 July-August 2011, pp. 385-393

(Elsharief et al. 2005) Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar.*Cement and Concrete Research 35 (2005) 1368-1376*

(Haque and Al-Khaial 1999) Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions.*Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 32, pp 533-538*

(Baronio et al. 1996) Steel corrosion monitoring in normal and total lightweight concrete exposed to chloride and sulfate solutions, Part II : Polarization resistance measurements .*Cement and Concrete Research 26 (5) (1996) 691-696*

(Osborne and Al-Khaiat 1995) Durability of lightweight aggregate concrete after 10 years in marine and acid environments .*International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. Sandefjord, Norway (1995), pp. 591-603*

(Valore 1980) Calculation of U-Values of hollow concrete masonry
Concrete International, V. 2, N° 2, Feb., pp. 40-63

(Couasnet 2007). Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction

Éditions du Moniteur, Paris 2007

(Adrian 1968). Béton léger considéré comme un matériau porteur : technologie du béton léger, calcul des ouvrages .*Rapport du congrès AIPC volume 8 (1968) publié le 14 05 2014 par Ein Dienst der ETH-bibliothek*

(Abrams and Gustaferro 1968). Fire endurance of concrete slabs as influenced by thickness, aggregate type and moisture .*Journal PCA Research Development Laboratories, V. 10, N° 2, pp. 9-24*

[106] Zakaria HAMADACHE Formulation et performances d'un autoplacant incorporant des granulats en caoutchouc. Unversité saad dahleb blida

(Helland et al. 2000) Structural LWAC. Specification and guideline for materials and production .*Edition 2nd International symposium on Structural lightweight aggregate concrete. Kristiansand 18-22 June 2000 ?Norwegian Concrete Association, pp. 802-810*

(Neville 1995) Properties of concrete.*Fourth and Final Edition. – 1995*

(Lo et al. 2007) Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal .self- compacting concrete

[Latifou Bello] Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables Thèse pour obtenir le grade de doctorat université Montpellier 2

[107] NA 442, Normes Algérienne., « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.

[108] EN 197-1, Normes Européenne., « Ciments courants »,1994.

[109] NF P 15-301., « Liants hydrauliques – définitions, classification et spécification des ciments », Juin 1994.

[110] NF P 15-476, Normes AFNOR., « Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse », Aout 1990.

[111] NF P 15-431, Normes AFNOR., « Liants hydrauliques – technique des essais détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[112] NF P 15-473, Normes AFNOR., « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination

du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[113] NF P 15-471, Normes AFNOR., « Méthodes d'essais des ciments -Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.

[114] NF P 18-303, Normes AFNOR., « Eau de gâchage pour béton », Aout 1990.

[115] These de covtorat d'etat . etude de l'influence des paramétres de formulation sur les propriétes d'un béton autoplacant **Othmane BOUKENDAKDJI**

[116] https://www.memoireonline.com/05/18/10219/m_Formulation-et-performances-d-un-beton-autoplaant-incorporant-des-granulats-en-caoutchouc20.html

[117] Mémoire de Magistère. Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction . *BENAKLI SARAH*

[118] THESE EN COTUTELLE Présentée pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE CERGY-PONTOISE ET DE L'UNIVERSITE DE MOSTAGANEM. Durabilité des bétons autoplaçants à base de VASE ET DE pouzzolane. BELARIBI OMAR

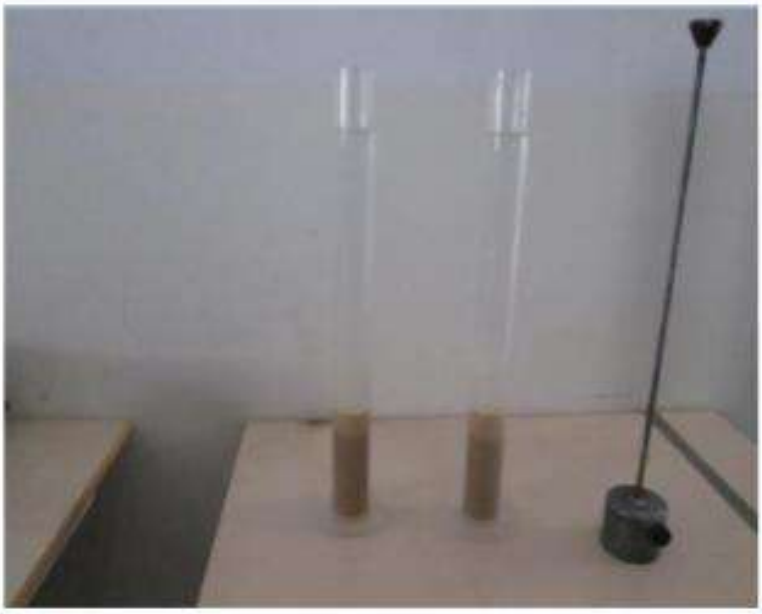
ANNEXE



Fiche technique de cimen



Fiche technique de liéges



L’essai d’equivalent de sable



Malaxage de béton