

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



مختار

باجي

جامعة

عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie civil

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux du Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Effet du degré de saturation des granulats légers d'argile
expansée sur le comportement des bétons autoplacants
légers à l'état frais et durci**

Présenté par : *BOUBAKEUR Hacem*

Encadrant : *ALI-BOUCETTA Tahar*

MCA

Université d'Annaba

Jury de Soutenance :

KHELIFI Walid	MCA	Université d'Annaba	Président
ALI-BOUCETTA Tahar	MCA	Université d'Annaba	Encadrant
BEHIM Mourad	Pr	Université d'Annaba	Examineur 1
KEBAILI Bachir	MCA	Université d'Annaba	Examineur 2

Année Universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

*Je remercie, en premier lieu, **Allah** le tout puissant de m' avoir donné la force pour effectuer ce présent travail.*

*Je remercie **mes parents** pour leur soutien pour me permettre d'atteindre ce que je suis aujourd'hui.*

*J'exprime mes plus sincères remerciements et ma gratitude a mon encadreur **Mr. Tahar ALI-BOUCETTA**, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, pour son aide et son encadrement, ses encouragements et les efforts fournis pour faire de ce travail un succès.*

*Je remercie beaucoup **Mme Drouna Karima**, doctorante au département de génie civil, je lui souhaite une bonne continuation dans son parcours de doctorat.*

*Je remercie également les membres de jury **Mr. KHELIFI Walid, Mr. BEHIM Mourad et Mr. KEBAILI Bachir** d' avoir accepté de présider le jury et d'examiner ce mémoire.*

*Sans oublier, je remercie également les ingénieurs du laboratoire, **Mr. KAMEL et Mr. KHAIR- EL DINNE**, et tous **mes collègues** pour leurs aides.*

Merci beaucoup à tous...

Hacen

RÉSUMÉ

AUTEUR	BOUBAKEUR Hacen
TITRE	Effet du degré de saturation des granulats légers d'argile expansée sur le comportement des bétons autoplaçants légers à l'état frais et durci
ENCADRANT	Dr. Tahar ALI-BOUCETTA, Maître de conférences à l'Université Badji Mokhtar – Annaba

Un béton autoplaçant léger (BAPL), est un béton qui se caractérise par sa fluidité et sa légèreté, d'ailleurs 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 un béton autoplaçant léger à base de granulats légers d'argile expansé en remplacement total des granulats naturels. La difficulté majeure est de garder une ouvrabilité élevée et une très bonne stabilité, cela est principalement liée à la forte absorption des granulats légers. Pour cela, plusieurs états de saturations des granulats d'argile expansé ont été étudiés afin de connaître la meilleure façon d'introduire ces granulats légers.

Les résultats obtenus montrent qu'il est faisable de maintenir les propriétés rhéologiques des BAPL et des propriétés mécaniques correctes tout en réduisant le poids propre du matériau.

Mots clés : Béton autoplaçant légers (BAPL), granulats légers, argile expansé, teneur en eau.

ABSTRACT

AUTHOR BOUBAKEUR Hacem

TITLE Effect of the degree of saturation of lightweight expanded clay aggregates on the behavior of lightweight self-compacting concretes in the fresh and hardened state

FRAMER Dr. Tahar ALI-BOUCETTA, Associate Professor of Badji Mokhtar Annaba University

A lightweight self-compacting concrete (LWSCC) is a concrete that is characterized by its fluidity and its lightness, moreover it is very deformable and stable. It can be set up without vibrations while remaining homogeneous and without segregation even in heavily scraped environments. It adapts perfectly to the shapes of the most complex formwork.

The objective of this research is to develop a lightweight self-compacting concrete based on lightweight expanded clay aggregates as a total replacement for natural aggregates. The major difficulty is to keep a high workability and a very good stability, this is mainly related to the strong absorption of light aggregates. For this, several states of saturation of expanded clay aggregates have been studied in order to know the best way to introduce these lightweight aggregates.

The results obtained show that it is possible to maintain the rheological properties of LWSCC and correct mechanical properties while reducing the self-weight of the material.

Keywords : Lightweight self-compacting concrete (LWSCC), lightweight aggregates, expanded clay, water content.

ملخص

المؤلفون	بوبركر حسان
عنوان	تأثير درجة تشبع مجاميع الطين الموسعة خفيفة الوزن على سلوك الخرسانة خفيفة الوزن ذاتية الضغط في الحالة الطازجة والحالة الصلبة
مقررا	د. علي بوسنة الطاهر, أستاذ محاضر في جامعة باجي مختار - عنابة

الخرسانة خفيفة الوزن المضغوطة ذاتيًا هي الخرسانة التي تتميز بسيولتها وخفتها، علاوة على أنها قابلة للتشوه ومستقرة للغاية. يمكن إعداده بدون اهتزازات بينما يظل متجانسًا وبدون فصل حتى في البيئات شديدة الكشط. يتكيف بشكل مثالي مع أشكال القوالب الأكثر تعقيدًا.

الهدف من هذا البحث هو تطوير خرسانة خفيفة الوزن ذاتية الدمج تعتمد على ركام الطين الموسع خفيف الوزن كبديل كلي للركام الطبيعي. تكمن الصعوبة الرئيسية في الحفاظ على قابلية تشغيل عالية واستقرار جيد للغاية، ويرتبط هذا بشكل أساسي بالامتصاص القوي للمجموعات الخفيفة. لهذا، تمت دراسة العديد من حالات تشبع ركام الطين الموسع من أجل معرفة أفضل طريقة لإدخال هذه المجاميع الخفيفة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن الحفاظ على الخصائص الانسيابية لهذه الخرسانة وتصحيح الخواص الميكانيكية مع تقليل الوزن الذاتي للمادة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة خفيفة الوزن ذاتية الدمج. الركام خفيف الوزن. الطين الموسع. محتوى الماء.

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE 2

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION	7
2. DIFFÉRENTS TYPES DE GRANULATS LÉGERS	8
2.1. Granulats naturels.....	8
2.2. Granulats artificiels	9
3. PROCÉDÉS DE FABRICATION DES GRANULATS LÉGERS	11
3.1. Granulats légers naturels	11
3.2. Granulats légers artificiels.....	11
4. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS LÉGERS	12
4.1. Masse volumique.....	12
4.2. Porosité.....	12
4.3. Absorption d'eau	
5. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES GRANULATS LÉGERS	14
5.1. Résistance des granulats légers	14
5.2. Caractéristiques élastiques des granulats légers	14
6. CARACTÉRISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	15
6.1. Caractérisations à l'états frais.....	15
6.2. Caractérisations a l'états durci.....	16
7. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS	17
7.1. Méthodes de formulation des BAP légers	17
7.2. Effets des granulats légers sur les propriétés à l'état frais des BAPL.....	18

8. CONCLUSION	23
----------------------	-----------

CHAPITRE II

MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

1. INTRODUCTION	26
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	26
2.1. Le ciment.....	26
2.2. Filler Calcaire.....	27
2.3. Superplastifiant.....	27
2.4. Les granulats	28
3. MÉTHODE DE FORMULATION, CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES	29
3.1. Procédure de formulation des BAPN	29
3.2. Procédure de formulation des BAPL	30
3.3. Séquences de malaxage des bétons	35
3.4. Conservation des éprouvettes	35
4. ESSAIS RÉALISÉS SUR LES BAP	36
4.1. A l'état frais.....	36
4.2. Résistance à la compression.....	39
5. CONCLUSION	40

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION	43
2. CINÉTIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS LEGERS	43
3. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT FRAIS	44
3.1. L'étalement au cône d'Abrams.....	45
3.2. Temps d'étalement (T_{50})	46
3.3. Écoulement à la Boîte en L	47
3.4. Stabilité au tamis	48
3.5. Observation visuelle de l'homogénéité des BAPL sur éprouvette durci	50
3.6. Mesures de la masse volumique sur béton frais	51
4. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT DURCI	52
5. CONCLUSION	53
CONCLUSION GÉNÉRALE	55

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

58

ANNEXES

Annexe A : Fiche technique du ciment	62
Annexe B : Fiche technique du filler calcaire	64
Annexe C : Fiche technique du superplastifiant.....	66

Table des figures

1.1	Pierre ponce.....	8
1.2	Diatomite	9
1.3	La pouzzolane naturelle.....	9
1.4	Granulats d'argile expansée	10
1.5	Granulats de schiste expansé.....	10
1.6	Étalements de BAPL identifiés dans la littérature	19
1.7	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAPL identifiés dans la littérature ...	21
1.8	Résistance moyenne à la compression de BAPL identifiés dans la littérature.....	22
2.1	Courbe granulométrique des granulats	29
2.2	Observations visuelles tirées de l'essai d'étalement d'un BAPL.....	34
2.3	Essai d'étalement au cône d'Abrams	36
2.4	Mesure du diamètre d'étalement au cône d'Abrams	36
2.5	Essai à la boîte en L (L-Box test)	37
2.6	Schéma de la boîte en L (L-Box test)	38
2.7	Essai de stabilité au tamis.....	38
2.8	Essai de compression	39
3.1	Cinétique d'absorption des granulats légers d'argile expansée.....	44
3.2	Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur l'étalement des BAPL.....	45
3.3	Corrélation entre l'étalement des BAPL et la teneur en eau des granulats d'argile expansée	46
3.4	Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur le T_{50} des BAPL.....	47
3.5	Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur l'écoulement à la boîte en L des BAPL	48
3.6	Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur la stabilité au tamis	49
3.7	Distribution des gravillons dans les BAPL	50
3.8	Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur la masse volumique des bétons.....	51
3.9	Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur les résistances mécaniques en compression.....	52

Liste des tableaux

1.1	Absorption des granulats légers artificiels courants (Castro et al, 2011)	13
1.2	Les différents essais à l'états frais	15
1.3	Les différents essais à l'état durci.....	16
2.1	Propriétés physiques du ciment	26
2.2	Composition chimique du ciment.....	27
2.3	Composition minéralogique	27
2.4	Composition chimique et propriétés physiques du filler calcaire.....	27
2.5	Caractéristiques techniques	28
2.6	Caractéristiques des granulats	28
2.7	Paramètres d'entrée de l'outil de calcul.....	32
2.8	Composition des mélanges	33
2.9	Séquence et durée de malaxage du BAPN	35
2.10	Séquence et durée de malaxage des BAPL	35

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Grâce à l'amélioration des performances du béton et des conditions de travail qu'ils procurent, les bétons autoplaçants (BAP) sont considérés aujourd'hui comme étant l'une des plus importantes innovations depuis de nombreuses décennies dans le domaine du béton.

Les BAP sont aujourd'hui très utilisés en préfabrication, tant pour la réalisation de produits destinés aux bâtiments que pour le génie civil. L'intérêt de ces matériaux n'est plus à démontrer. Les BAP ont pris une part de marché importante en raison de leurs propriétés rhéologiques intrinsèques qui leurs confèrent de nombreux avantages : augmentation de la productivité, amélioration des conditions de travail, diminution des nuisances sonores, meilleure qualité des parements,...

Les BAP sont utilisés pour réaliser de nombreux produits préfabriqués. On peut citer notamment les panneaux et voiles verticaux (panneaux de façade, encadrements de portes et fenêtres, encadrements de baies...), les éléments de structure (poteaux précontraints, poutres, poutrelles, dalles, appuis, pré-linteaux, caissons précontraints, longrines...), d'assainissement (cunettes, fonds de regard, cuves et citernes...), de génie civil (bordures, glissières de sécurité, chambres d'éclairage public, gradins...).

Parallèlement, les granulats légers sont maintenant intégrés dans le contexte normatif et leur utilisation dans l'industrie est croissante également. L'utilisation de granulats légers est une des principales solutions lorsqu'il s'agit d'apporter au béton des performances d'isolation thermique. Par ailleurs, la diminution du poids des éléments préfabriqués facilite les opérations de transport et de manutention ainsi que la pose. Il intervient également directement sur le dimensionnement et donc sur le coût des fondations des bâtiments et des ouvrages de génie civil.

L'objectif de l'étude est de formuler un béton caractérisés à la fois par le caractère autoplaçant et par l'utilisation de granulats légers en remplacement des granulats naturels de masse volumique traditionnelle. Cette étude représente une partie d'une thèse de doctorat qui traite sur les bétons autoplaçants légers fabriqués avec des granulats d'argile expansé.

L'un des principaux inconvénient des granulats d'argile expansé c'est la forte absorption d'eau des granulats légers qui pose problème par rapport à la fluidité extrême des BAP, par conséquent, leur introduction dans le béton doit être à l'état humide afin de réduire

l'absorption du granulat dans la pâte. La problématique de ce travail est d'étudier l'effet du degré de saturation des granulats légers d'argile expansée sur les propriétés des BAP.

Le mémoire est partagé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les granulats légers et leurs utilisations dans les bétons autoplaçants avec leurs différentes propriétés physico-mécaniques. Ensuite, l'effet de ce type de granulat sur les propriétés à l'état frais et durci des BAPL a été abordé.
- Le deuxième chapitre présente les caractéristiques des matériaux qui ont été utilisés dans cette étude. De plus, les différentes méthodes expérimentales qui ont servi pour mettre en évidence les différentes propriétés des BAP formulés à l'état frais et à l'état durci sont exposées.
- Le dernier chapitre présente les résultats et discussions qui ont été obtenus suite à l'étude de l'effet du degré de saturation des granulats légers d'argile expansée sur les propriétés des bétons autoplaçants légers à l'état frais et durci.

On termine avec une conclusion générale, dont laquelle on rappelle les principaux résultats obtenus durant cette étude.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce premier chapitre, on présente une revue bibliographique sur les granulats légers et leurs utilisations dans les bétons autoplaçants avec leurs différentes propriétés physico-mécaniques. Ensuite, l'effet de ce type de granulat sur les propriétés à l'état frais et durci des BAPL a été abordé.

Sommaire

1. INTRODUCTION	7
2. DIFFÉRENTS TYPES DE GRANULATS LÉGERS	8
3.3. Granulats naturels.....	8
2.1.1. Pierre ponce.....	8
2.1.2. Diatomite.....	8
2.1.3. Pouzzolane naturelle	9
3.4. Granulats artificiels	9
3.4.1. Argile expansée.....	10
3.4.2. Schistes expansée	10
3.4.3. Laitier	11
3. PROCÉDÉS DE FABRICATION DES GRANULATS LÉGERS	11
3.1. Granulats légers naturels	11
3.2. Granulats légers artificiels.....	11
4. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS LÉGERS	12
4.1. Masse volumique.....	12
4.2. Porosité.....	12
4.3. Absorption d'eau	13
5. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES GRANULATS LÉGERS	14
5.1. Résistance des granulats légers	14
5.2. Caractéristiques élastiques des granulats légers	14
6. CARACTÉRISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	15
6.1. Caractérisations à l'états frais.....	15
6.2. Caractérisations a l'états durci.....	16

7. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS	17
7.1. Méthodes de formulation des BAP légers	17
7.2. Effets des granulats légers sur les propriétés à l'état frais des BAPL	18
7.2.1. Étalement	18
7.2.2. Viscosité apparente	20
7.2.3. Résistance à la ségrégation des BAPL.....	21
7.2.4. Effets des granulats légers sur les propriétés à l'état durci des BAPL ...	21
8. CONCLUSION	23

Chapitre I Étude bibliographique

1. INTRODUCTION

Une des techniques d'allègement des structures en béton consiste à remplacer totalement ou partiellement les granulats de masse volumique normale par des granulats légers. Les granulats légers sont des granulats poreux voire très poreux présentant une structure interne alvéolée dont ils tiennent leur légèreté. Cette structure interne est obtenue soit de façon naturelle soit de façon artificielle par l'application d'un traitement thermique. Cette structure particulière est à l'origine des propriétés thermiques et acoustiques dont bénéficient les bétons légers.

La porosité et la légèreté des granulats légers bien qu'étant d'un avantage certain pour l'allègement des structures en béton, se révèlent être deux problématiques majeures dans le processus de formulation des bétons de granulats légers. 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 à l'état frais du béton. Ce phénomène peut également réduire l'ouvrabilité du béton frais en provoquant un raidissement précoce du matériau ; ce qui est d'autant plus vrai pour les bétons autoplaçants légers. Toutefois, l'absorption peut favoriser dans une certaine mesure, l'adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats légers et donc améliorer les propriétés de l'interface matrice/granulat.

De plus, la légèreté des granulats poreux 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 accroître la propension des bétons légers à la ségrégation. Cette sensibilité à la ségrégation est plus accrue dans le cas des bétons autoplaçants légers (Lo et al. 2007).

En pratique pour limiter le risque de perte de maniabilité, les granulats légers sont soit pré-mouillés, soit traités en surface avec des substances hydrofuges ou soit conditionnés à l'état saturé sec en surface avant leur incorporation dans le béton (Zhang and Gjørv, 1991), (De Larrard, 1999).

2. DIFFÉRENTS TYPES DE GRANULATS LÉGERS

Les granulats légers sont des roches à l'état naturel, mais la majorité des granulats légers utilisés est manufacturée à partir de matières premières naturelles (argile, schiste, ardoise) ou de sous-produits industriels (laitiers, cendres volantes).

La principale caractéristique des granulats légers est leur porosité élevée qui se traduit par une faible densité apparente. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulats légers secs sur le volume qu'elle occupe dans l'eau (Venuat, 1983).

2.1. Granulats naturels

Un certain nombre de granulats légers existe à l'état naturel, parmi les granulats d'origine minérale naturellement poreux : la pierre ponce, la diatomite et la pouzzolane.

2.1.1. Pierre ponce

La pierre ponce est un matériau naturel d'origine volcanique, (figure I.1) et dans sa composition chimique on trouve une forte proportion de trois minéraux : la silice, l'alumine et l'alcali. Il est formé par le refroidissement soudain de la lave. Ses éléments sont ronds (granulés de diamètre maximum 10 à 20 mm). Il est de couleur gris clair, très poreux et de faible densité (il peut flotter sur l'eau) (Herihiri, 2010). La ponce est utilisée dans les bétons de structure et d'isolation, cependant sa faible masse volumique conduit à une faible résistance à la compression du béton.



Figure I.1. Pierre ponce

2.1.2. Diatomite

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse constituée essentiellement de squelettes de diatomées (algues unicellulaires). Les matériaux diatomitiques bruts font l'objet d'un traitement en usine, qui comprend principalement le broyage, le séchage, la sélection

granulométrique, la calcination et l'activation (calcination avec ajout d'un agent fanant) (Brgm, 1996).

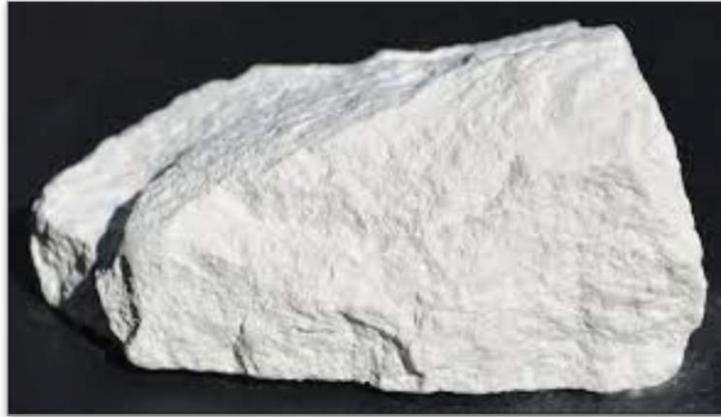


Figure I.2. Diatomite

2.1.3. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane provient de la cristallisation de magma volcanique refroidi assez lentement (scorie, lave mousseuse, crasse volcanique). La roche s'exploite en carrière, elle est parfois lavée, concassée et criblée. La pouzzolane est colorée en rouge brun, en noire ou en teinte intermédiaire. C'est une roche silico-alumineuse (par EX : $\text{SiO}_2=50\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=20\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=10\%$). Sa densité est un peu plus élevée que celle de la ponce, de l'ordre de 700 à 900 kg/m^3 . Les bétons confectionnés de la pouzzolane sont un peu plus denses et plus résistants que les bétons de ponce (Contant, 2000).



Figure I.3. La pouzzolane naturelle

2.2. Granulats artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, soit à partir de sous-produits comme les laitiers, les cendres volantes frittés ou le polystyrène expansé (Laukaitis et al., 2005).

Les granulats artificiels sont les granulats d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres.

2.2.1. Argile expansée

L'argile expansée est certainement actuellement le matériau le plus fabriqué dans le monde. Le principe de la fabrication est connu depuis le dépôt en 1917 du brevet américain d'Hyatt (pour l'argile et aussi pour le schiste expansé). La production industrielle a commencé vers 1928 et actuellement dans le monde il existe plusieurs centaines d'usines (Herihiri, 2010). Les argiles ne sont pas toutes susceptibles de gonfler sous l'effet de la chaleur. En effet, seules les argiles contenant de la pyrite, de l'hématite ou de la dolomie sont réactives. A la fin du processus d'expansion, on obtient des particules de forme généralement arrondie, présentant une peau brune rougeâtre enveloppant une texture alvéolaire noirâtre (Herihiri, 2010).



Figure I.4. Granulats d'argile expansée

2.2.2. Schistes expansés

Les schistes servant à la fabrication des granulats légers peuvent provenir de diverses origines, soit de schistes naturels (schistes carbonifères, houillers et bitumineux), ou de schistes plus classiques, en provenance de carrière ou encore d'ardoise (Contant, 2000).



Figure I.5. Granulats de schiste expansé

2.2.3. Laitier

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Plusieurs traitements permettent d'obtenir des granulats légers à partir du laitier en fusion (Herihiri, 2010).

a. Le laitier expansé

Le laitier expansé s'obtient en se refroidissant dans une fosse au fond dont laquelle on envoie des jets d'eau sous pression. La roche obtenue a une structure alvéolaire, elle est concassée et criblée. La densité des granulats varie de 600 à 900 kg/m³ (Herihiri, 2010).

b. Le laitier bouleté

Le laitier bouleté est obtenu à partir du laitier liquide par dispersion mécanique dans l'air grâce à un tambour rotatif. Le laitier prend la forme de boulettes de 1 à 20 mm, de structure vitreuse extérieurement vitreuse, les granulats les plus gros ont un cœur cristallisé. La densité des grains de 4/ 10 mm varie entre 800 et 900kg/m³ (Herihiri, 2010).

La composition chimique des laitiers est en grande partie constituée de silice, d'alumine et de chaux. Ils sont obtenus lors de la production de la fonte dans les hauts fourneaux.

3. PROCÉDÉS DE FABRICATION DES GRANULATS LÉGERS

3.1. 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.

3.2. 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 1100 et 1500°C). Il existe différents procédés qui dépendent de la matière première utilisée, du mode de préparation et du système de cuisson. Il s'agit entre autre du procédé par :

- four rotatif ;
- four à grille pour le frittage ;
- lit fluidisé ;
- autoclave.

Un procédé utilisant une ligne de micro-ondes est apparu récemment. Les fours équipés de brûleur sont remplacés par des fours alimentés aux micro-ondes (magnétons) pour l'expansion et la cuisson des granulats légers. Les différents procédés sont fondés sur les mêmes principes et visent la formation de grains avant la cuisson et l'élimination lente de l'eau de façonnage pour éviter l'éclatement des grains. La valorisation des sédiments, des co-produits et des déchets industriels ouvre la voie à la production des granulats légers à partir des résidus tels que les boues de décantation et de dragage.

4. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS LÉGERS

4.1. Masse volumique

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 2000 kg/m^3 .
- le granulat courant : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle comprise entre 2000 et 3000 kg/m^3 .
- le granulat lourd : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle supérieure ou égale à 3000 kg/m^3 .

4.2. Porosité

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité varie de 25 jusqu'à 75 % du volume apparent, la porosité des granulats manufacturés varie proportionnellement à la taille des grains, plus la taille des grains augmente plus ils sont poreux et la densité apparente diminue. La porosité peut également dépendre du préformage avant l'expansion. La taille de

pore varie considérablement de moins de 4mm jusqu'à plus de 1mm. La taille et la distribution des pores influencent la résistance des granulats (Swamy et Lambert, 1981). Le pourcentage des pores ouverts dans l'ensemble des pores sont variable par apports la nature des granulats léger (Zhutovsky et al., 2004).

4.3. Absorption d'eau

L'absorption d'eau par les granulats légers dépend de leur réseau poral et de la présence ou non d'une enveloppe plus dense à la surface des granulats. Les données de la littérature montrent que l'absorption d'eau des granulats légers manufacturés initialement secs varie généralement entre 10 et 20% après 24 heures d'immersion. Cependant, le taux d'absorption initial est très élevé : plus de 50% de l'absorption est souvent complétée dès les toutes premières minutes (Swamy et Lambert, 1981).

Pour les granulats cassés, l'absorption de l'eau après les 30 premières minutes d'immersion est environ 30% supérieure à celle des granulats entiers de même surface. Les différences d'absorption sont moins importantes pour les granulats ne présentant pas ou peu de différence de microstructure entre l'intérieur et la surface. Le tableau I.1 présente les coefficients d'absorptions des différents granulats légers.

Tableau I.1. Absorption des granulats légers artificiels courants (Castro et al, 2011)

Coefficient d'absorption d'eau (%)					
Types de granulats	Masse volumique réelle (kg/m ³)	6h	24h	48h	Sous vide à 24h
Argile	1290	13,2	16,0	17,6	26,8
Argile	1490	13,1	15,0	16,7	27,0
Argile	1100	25,4	30,5	32,6	35,5
Argile	1390	15,3	17,7	18,4	19,1
Schiste	1450	15,6	17,5	18,3	22,5
Schiste	1500	12,4	14,1	14,6	24,9
Schiste	1560	7,4	10,0	11,1	20,0
Schiste	1400	12,9	15,6	16,5	18,6
Schiste	1510	12,5	15,0	16,1	22,0
Schiste	1380	16,4	19,1	20,5	25,2
Schiste	1460	14,9	17,9	19,1	24,9
Schiste	1480	15,9	18,9	20,1	24,6
Schiste	1490	15,6	18,5	19,4	23,0
Ardoise	1620	9,9	12,2	13,1	18,6
Ardoise	1510	5,2	6,0	6,5	11,4

5. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES GRANULATS LÉGERS

5.1. Résistance des granulats légers

L'essai d'écrasement au pot est l'essai le plus facile et le plus utilisée (Arnould et Virlogeux, 1986), le principe de cet essai est de mesurer la résistance à l'écrasement en vrac. Cependant, les résultats ne représentent pas la résistance des granulats confinés dans le béton. Le mode opératoire de cette méthode est le suivant, un échantillon de granulats compacté par vibration est comprimé à l'aide d'un piston dans cylindre de 100 mm d'hauteur. La vitesse d'enfoncement du piston est de 0.2 mm par seconde et l'essai est terminé lorsque l'enfoncement du piston atteint 20 mm. La résistance conventionnelle des grains en N/cm^2 est définie par le quotient de la force nécessaire pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre.

L'essai de compression hydrostatique qui caractérise la résistance à la pression hydrostatique (pression de rupture). L'essai consiste à prendre un granulat léger dans une enceinte plastique très déformable, qui est placée à l'intérieur d'un bain d'huile de la presse. Cette huile est mise en pression, par étapes, jusqu'à l'écrasement du granulat léger en triple étreinte, qui se manifeste par une brusque chute de pression. La résistance du grain est alors caractérisée par la pression de rupture.

L'essai au fil donne la résistance à la traction par fendage. il est obtenu en plaçant un mince fil d'acier autour d'un granulat léger et à exercer une traction croissante, jusqu'à ce que le grain soit coupé en deux. La résistance du grain est caractérisée par le rapport de la force de traction à rupture à la surface de la boucle que forme le fil d'acier autour du grain.

5.2. Caractéristiques élastiques des granulats légers

Le module d'élasticité du béton a été considéré comme un facteur essentiel dans la conception de structures en béton. Pour prédire efficacement le module d'élasticité du béton léger, il faut d'abord évaluer le module d'élasticité du granulat léger. Les granulats légers synthétiques couramment utilisés dans la construction en béton possèdent des intérieurs très poreux et des extérieurs relativement denses. Une méthode dynamique développée par Muller (Muller, 1979) permet d'évaluer le module élastique des granulats légers par des mesures de vitesse de propagation d'ondes à ultrasons. Dans cet essai, les vitesses d'impulsion des ondes longitudinales et transversales à travers des granulats sont mesurées. Le module d'Young, le coefficient de poisson, le module de cisaillement sont obtenus par corrélation avec vitesse. L'exactitude des valeurs est contrôlée sur matériaux connus comme l'acier et le verre. A partir

des différentes mesures réalisées par ultrasons et présentées, le manuel « lightweight concerté » édité par la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) et le CEB (Comité Européen de Béton) et l'ACI (CEB-FIB, 1977), (CEB-FIB, 1980) proposent une relation empirique entre le module de déformation dynamique assimilé au module d'Young (Eg) et la masse volumique des grains (ρ_g).

6. CARACTÉRISATION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

6.1 Caractérisations à l'états frais

Les propriétés générales d'un BAP frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage. Le tableau I.2 regroupe les différents essais de caractérisation des BAP à l'état frais.

Tableaux I.2. Les différents essais à l'états frais

Essais	Définition
Étalement	L'essai est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP
Boite en L (L-box)	La boite en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptable
Entonnoir en V (v-funnel)	L'essai est réalisé en mesurant le temps que met le béton à s'évaluer à travers l'entonnoir sous son propre poids il y a deux classes VF1 < 9s , VF2 = 9s à 25s
Stabilité au tamis	Appelé aussi essai de caractérisations de la ségrégations des BAP et il y a deux classe $P \leq 20\%$, $P \leq 15\%$
Essai à la colonne	Permet d'évaluer la résistance à la ségrégation, lorsque le coefficient de variation de la distribution le long de la colonne noté I_{seg} est inférieur à 4 %.

6.2 Caractérisations a l'états durci

Le comportement à l'état durci se rapporte essentiellement aux essais concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait est la durabilité des bétons autoplaçants. Le tableau I.3 regroupe les différents essais de caractérisation à l'état durci.

Tableaux I.3. Les différents essais à l'état durci

Essais	Définition
Résistance à la compression	La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. C'est sur elle que se basent le calcul et le dimensionnement d'une structure en béton.
Résistance à la traction	Pour simplifier, on considère généralement que la résistance à la traction est égale au 1/10ème de la résistance à la compression de ce même béton
Module d'élasticité	Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$)
Durabilité	La pérennité d'un ouvrage en béton et sa durabilité dans le temps, dépend de plusieurs paramètres liés d'une part à l'environnement (nature, concentration et renouvellement ou non des éléments agressifs) et d'autre part au matériau lui-même (nature et dosage des constituants, conditions de fabrication et de cure).

7. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS LÉGERS

Le béton autoplaçant léger (BAPL), 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 BAPL 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 (Arnould et Virlogeux, 1986).

7.1. Méthodes de formulation des BAP légers

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. 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 boîte 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.

Les chercheurs ont proposé des adaptations des méthodes de formulation courantes pour la composition des BAPL. Les contributions portent notamment sur la prise en compte de l'absorption et la légèreté des granulats légers (Okamura et Ouchi, 2003).

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 (Neville, 1995). Dans la pratique, l'absorption différée du granulats légers peut se traduire par une chute brutale de l'ouvrabilité du béton en présence de granulats légers secs ou pré-humidifiés (Papanicolaou et Kaffetzakis, 2011).

Les méthodes de formulation traditionnelles de bétons auto-plaçant de masse volumique normale (BAPN) sont adaptées pour la formulation des BAPL (Bello, 2014). 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 (Lepesqueux, 2012), 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 (Densifier Mixture Design Algorithme) 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.

7.2. Effets des granulats légers sur les propriétés à l'état frais des BAPL

La caractérisation des BAPL au même titre que les BAPN passe par la détermination des propriétés génériques qui sont :

- La capacité de remplissage qui donne l'aptitude du mélange à se mettre en place sous l'effet de sa gravité et à remplir le volume offert ;
- La capacité de passage qui détermine l'aptitude du matériau à résister au blocage dans un milieu confiné ;
- La résistance à la ségrégation qui évalue la capacité du mélange à résister à une séparation entre les phases sous l'effet d'interactions dissipatives.

Les propriétés à l'état frais sont déterminées à partir d'essais d'écoulement et d'essais de résistance à la ségrégation. Les essais d'écoulement tels que l'étalement au cône, le temps de passage à l'entonnoir en V et le taux de remplissage à la boîte en L permettent d'évaluer la capacité de remplissage et de passage. Les essais de stabilité tels que l'essai au tamis et l'essai à la colonne permettent de caractériser la résistance à la ségrégation du béton.

7.2.1. Étalement

L'essai d'étalement permet de mesurer la mobilité du BAP en l'absence d'obstacles. L'étalement peut être déterminé selon la norme NF EN 12350-8. Différents BAPL contenant des granulats légers d'origine minérale (rhyolite expansée, argile expansée, ardoise expansée,

endre volante frittée, perlite expansée) et des granulats de polystyrène ont été recensés dans la littérature par Bello (Bello, 2014). La figure I.6 présente les résultats récoltés par l'auteur.

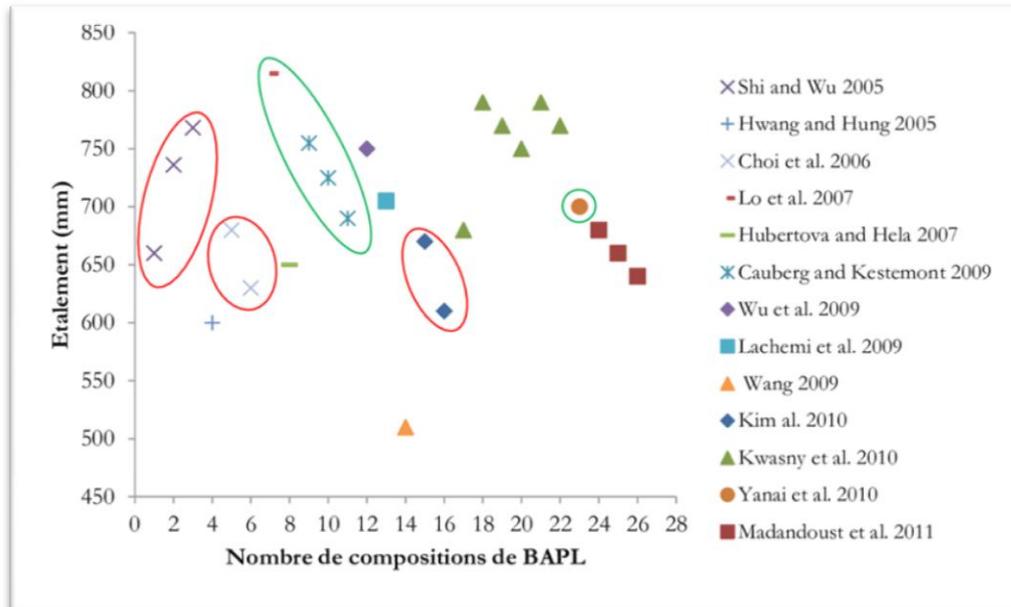


Figure I.6. Etalements de BAPL identifiés dans la littérature

L'auteur constate que pour la plupart des compositions, l'étalement se trouve dans la plage de référence 550 et 850 mm malgré la présence de granulats légers poreux. Ce constat s'explique par l'anticipation du raidissement précoce par un pré-mouillage des granulats poreux et la prise en compte du risque de ségrégation par l'utilisation d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité pour adapter la qualité de la pâte. L'ajout d'un entraîneur d'air permet selon les auteurs, d'améliorer l'écoulement de certains bétons avec le risque à forte dose de réduire les performances mécaniques. Dans les différentes formules présentées, les granulats légers poreux sont pré-humidifiés de diverses façons afin d'avoir une teneur eau initiale adaptée. Les différents états de saturation initiale des granulats légers sont :

- état saturé sec en surface après immersion dans l'eau pendant 24 heures.
- état de surface sec à l'issue de l'égouttage après immersion dans l'eau pendant 24 heures.
- état de surface sec à l'issue de l'égouttage après immersion dans l'eau pendant 30 minutes.
- état de surface humide obtenu à l'issue du malaxage des granulats légers avec une partie de l'eau de malaxage pendant 1 à 30 minutes.
- état de surface sec obtenu par un arrosage régulier pendant plusieurs jours.

(Hubertova et Hela, 2007), ont observé l'influence de la pré-humidification sur l'écoulement et le maintien de rhéologie des BAPL. L'étude comparative a porté sur les propriétés à l'état frais de deux types de BAP de granulats légers d'argile expansée dont l'un incorpore les gravillons secs et l'autre des gravillons pré-humidifiés. Les résultats montrent que la pré-humidification des granulats d'argile expansée a favorisé l'écoulement et le maintien de rhéologie du BAPL. Les résultats de (Cauberg et Kestemont, 2009) sur la formulation de BAPL d'argile expansée ont montré que le pouvoir absorbant des granulats légers est significativement réduit lorsque l'essai d'absorption d'eau est réalisé avec des granulats d'argile expansée de teneur en eau initiale comprise 15 et 20 % en masse.

L'adjuvantation des BAPL joue aussi un rôle important. Le super plastifiant est combiné avec un agent de viscosité et même parfois avec un entraîneur d'air pour améliorer la mobilité du béton léger. Sur la (Figure I.6), les compositions encadrées de vert contiennent un superplastifiant et un agent de viscosité tandis que les compositions encadrées en rouge contiennent un superplastifiant et un entraîneur d'air.

Pour valider l'aptitude à l'écoulement du BAP, l'essai d'étalement est complété par l'essai de la boîte en L qui caractérise la mobilité en présence d'obstacle. Le taux de remplissage à la boîte en L des bétons auto plaçant légers tirées de la littérature est supérieur à 0,80 comme pour les BAP traditionnels.

7.2.2. Viscosité apparente

La capacité de remplissage du BAP est associée à sa viscosité apparente. L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V régit par la norme la NF EN 1350-9 est l'un des essais permettant d'évaluer la viscosité apparente du béton frais. Il donne une indication sur la viscosité apparente au même titre que le T_{500} . La viscosité apparente est d'autant plus grande que le temps d'écoulement est grand.

(Bello, 2014) regroupe 25 formules de BAPL répertoriées dans la littérature et présentées à la (Figure I.7), indique que le temps d'écoulement à l'entonnoir en V se situe entre 3 à 24 secondes pour ce type de matériau.

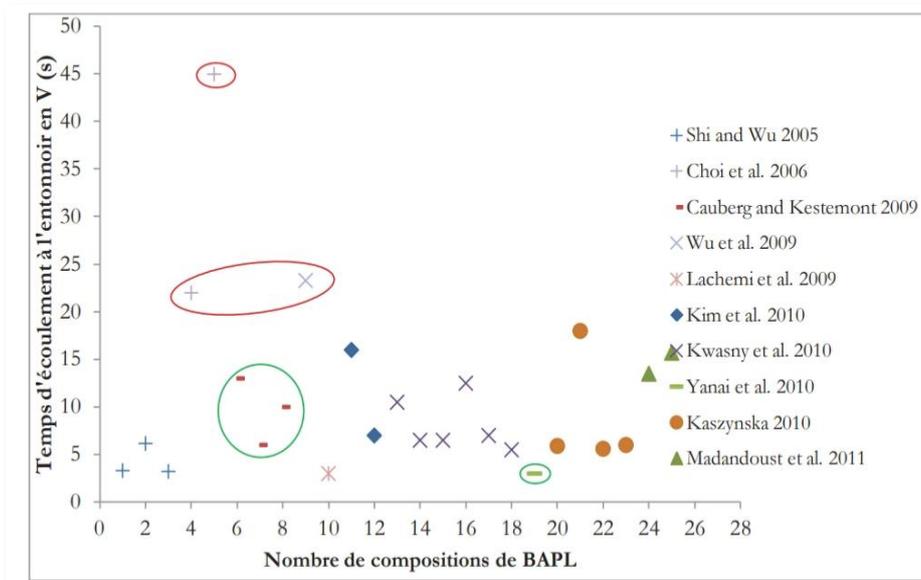


Figure I.7. Temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAPL identifiés dans la littérature

Nous constatons que les compositions contenant un agent de viscosité et encerclées en vert ne sont pas les plus visqueuses. Les compositions encerclées en rouge qui sont les plus visqueuses, doivent leur grande viscosité apparente au dosage élevé en super plastifiant avoisinant les 2 % d'extrait sec rapporté à la masse de ciment. Les travaux de (Banfill, 2011), montrent que l'effet des superplastifiants (à base de polycarboxylates) s'accompagne selon le dosage, d'une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité du béton.

7.2.3. Résistance à la ségrégation des BAPL

La ségrégation est un paramètre très important pour la validation d'un BAP (Lo et al., 2007). Pour les BAPL, il faut un seuil de cisaillement suffisamment faible pour assurer l'écoulement du matériau et une viscosité suffisamment grande pour maintenir les granulats légers dans la pâte et le préserver de la ségrégation. L'état de l'art sur les propriétés des BAPL présenté par (Papanicolaou et Kaffetzakis, 2011) indique deux méthodes pour caractériser la ségrégation de ce matériau. Il s'agit de l'essai à la colonne et de l'essai au tamis.

7.2.4. Effets des granulats légers sur les propriétés à l'état durci des BAPL

Les propriétés mécaniques des bétons légers sont intimement liées aux performances mécaniques et élastiques des granulats légers utilisés (Zhang et Gjörv, 1991) et (Arnould et Virlogeux, 1986). D'après (Papanicolaou et 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 que les propriétés à l'état frais (l'étalement au cône et le T_{500}) 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 recensés dans la littérature par Bello (Bello, 2014) sont présentées à la Figure I.8. (Bello, 2014) constat que la résistance moyenne des BAPL est comprise entre 30 et 60 MPa à l'exception des trois compositions de granulats de polystyrène expansé encerclées sur la (Figure I.8). Cette plage de résistances à la compression correspond à la gamme de résistances utilisée dans l'industrie du béton pour les produits de structure.

Par ailleurs, (Papanicolaou et Kaffetzakis, 2011), mentionnent que la masse volumique réelle sèche des BAPL se situent entre 1330 et 1990 kg/m^3 soit une réduction de poids propre comprise entre 10 et 40 % comparée à un béton traditionnel de masse volumique réelle sèche de 2200 kg/m^3 .

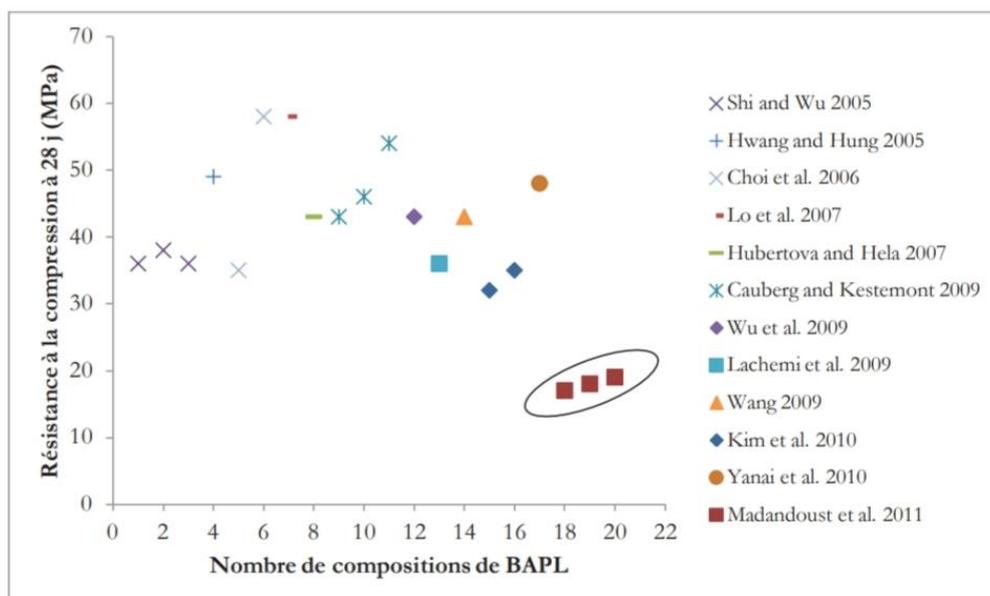


Figure I.8. Résistance moyenne à la compression de BAPL identifiés dans la littérature

8. CONCLUSION

Les BAPL 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 connaître l'effet de substitution des granulats naturels par des granulats légers sur les performances du BAP à l'état frais et à l'état durci.

Le but de ce travail était donc d'éclaircir la réponse sur deux questions majeures. La première, es ce qu'on peut combiner entre la légèreté et les exigences physiques et mécaniques de structure, et la 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 II

MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE II

MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation des matériaux qui seront utilisés durant ce travail et en particulier celles des granulats légers d'argile expansée. On présente également les approches de formulations ainsi que les différentes méthodes expérimentales sur lesquelles on s'appuiera pour la réalisation de la présente étude.

Sommaire

1. INTRODUCTION	26
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	26
2.1. Le ciment.....	26
2.2. Filler Calcaire	27
2.3. Superplastifiant.....	27
2.4. Les granulats.....	28
3. MÉTHODE DE FORMULATION, CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES	29
3.1. Procédure de formulation des BAPN	29
3.2. Procédure de formulation des BAPL.....	30
3.2.1. Les étapes de calcul.....	30
3.2.2. Mise en œuvre de la méthode.....	32
3.3. Séquences de malaxage de BAP	35
3.4. Conservation des éprouvettes	35
4. ESSAIS REALISES SUR LES BAP	36
4.1. A l'état frais	36
4.1.1. Essai d'étalement (flow test).....	36
4.1.2. Essai à la boîte en L (L-Box test).....	37
4.1.3. Essai de stabilité au tamis.....	38
4.2. Résistance à la compression	39
5. CONCLUSION	40

Chapitre II Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

1. INTRODUCTION

Afin d'étudier l'effet du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur le comportement des BAP à l'état frais et durci, le présent chapitre est dédié à la caractérisation des matériaux utilisés, de l'approche de formulation et les méthodes de caractérisation. De plus, ce chapitre va servir à vérifier si les caractéristiques des matériaux employés sont conforme aux normes en vigueur.

La caractérisation des granulats d'argile expansées va aussi être abordée dans ce chapitre, rappelons que ce sont des granulats non conventionnelles et à fort taux d'absorption d'eau et par conséquent ce genre de matériau doit bénéficier d'une attention particulière.

2. MATERIAUX UTILISÉS

2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland CEM I 42,5 R, fabriqué par la cimenterie de Biskra (SPA BISKRA CIMENT) (voir annexe A). La composition chimique, minéralogique ainsi que les propriétés physiques du ciment utilisé sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau II.1. Propriétés physiques du ciment

Propriétés	Unités	Résultats
Masse volumique absolue	kg/m ³	3100
Masse volumique apparente	kg/m ³	980
Refus au tamis 80µm	%	1,05
Refus au tamis 40µm	%	13,14
Consistance normale	%	25
Début de prise	min	150-190
Fin de prise	min	220-250
S.S.B	cm ² /g	3728

Tableau II.2. Composition chimique du ciment

Composition chimique (%)										
Cao	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	Cao libre	PAF
62,63	20,00	3,62	4,30	2,37	0,19	0,47	0,019	2,70	0,60	2,92

Tableau II.3. Composition minéralogique

Minéraux	Désignation	Teneur en (%)
Silicate tricalcique	C ₂ S	68,79
Silicate bicalcique	C ₃ S	8,33
Aluminate tricalcique	C ₃ A	5,57
Ferro aluminate tétracalcique	C ₄ AF	11,00

2.2. Filler Calcaire

Le filler calcaire (FC) utilisé dans cette étude qui est un carbonate de calcium sous forme de poudre, avec une teneur en CaCO₃ égale à 99,61 % (voir annexe B). De dénomination commerciale ALCAL UF10, il provient du gisement El-khroub qui occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine. Les propriétés physiques ainsi que la composition chimique sont données dans les tableaux II.4.

Tableau II.4. Composition chimique et propriétés physiques du filler calcaire

Composition chimique	Cao	53,49	Propriétés physiques	Masse volumique absolue	kg/m ³	2780
	Al₂O₃	0,02		Masse volumique apparente	g/cm ³	900
	Fe₂O₃	0,27				
	Si₂O₃	0,05		D_m	µm	9,69
	MgO	0,22				
	Na₂O	0,07		Inférieur à 40 µm	%	99
	K₂O	0,01				
	Cl⁻	0,00				
	SO₃	0,00		S.S.B	cm ² /g	6266
	PAF	43,29				

2.3. Superplastifiant

Pour maintenir un état de fluidité adéquat pour les BAP, on a utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de dénomination commerciale POLYFLOW LSR 8800 (voir annexe C). C'est un superplastifiant polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylate commercialisé par l'entreprise SOLU EST (Annaba). Les caractéristiques techniques du superplastifiant sont données dans le tableau II.5.

Tableau II.5.Caractéristiques techniques

Densité	1,07 ± 0,02
PH	5 à 5,5
Teneur en ions CL⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na₂O	≤ 1 %
Extrait sec	29%

2.4. Les granulats

Deux sables naturels ont été utilisés dans cette étude, le premier est un sable roulé (0/2) qui provient de la région de Tébessa. Le deuxième, est un sable de carrière (0/4) provenant de la carrière d'Ain Abid de la Wilaya de Constantine.

Pour les gros granulats, nous avons utilisés un gravier naturel d'une fraction (4/14) provenant de la même carrière que celle du sable de carrière de Ain Abid (Constantine), et un gravier léger d'argile expansée qui provient de l'usine ALGEXPAN de Bouinan de la Wilaya de Blida. Les gravillons d'argile expansée sont constitués de grains de forme quasi sphérique non concassé, obtenus par un traitement thermique sans additifs. Les caractéristiques physiques des différents granulats sont données dans le tableau II.6 et les courbes granulométriques sont présentées sur la figure II.1.

Tableau II.6. Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Unités	Sable de dune	Sable de carrière	Gravier naturel	Gravier léger
Masse volumique apparente	kg/m ³	1544	1624	1300	770
Masse volumique absolue	kg/m ³	2584	2470	2660	1280
d/D	Mm	0/2	0/4	4/14	4/14
Forme	-	Rond	Concassé	Concassé	Rond
Nature	-	Siliceux	Calcaire	Calcaire	Argile expansée
Module de finesse	-	1.87	2.62	-	-
Eq de sable	%	78.12	80.39	-	-
Coef d'absorption (24h)	%	-	-	2.31	9.23
Micro Deval	%	-	-	5.4	24.5
Los Angeles	%	-	-	24.02	27.7

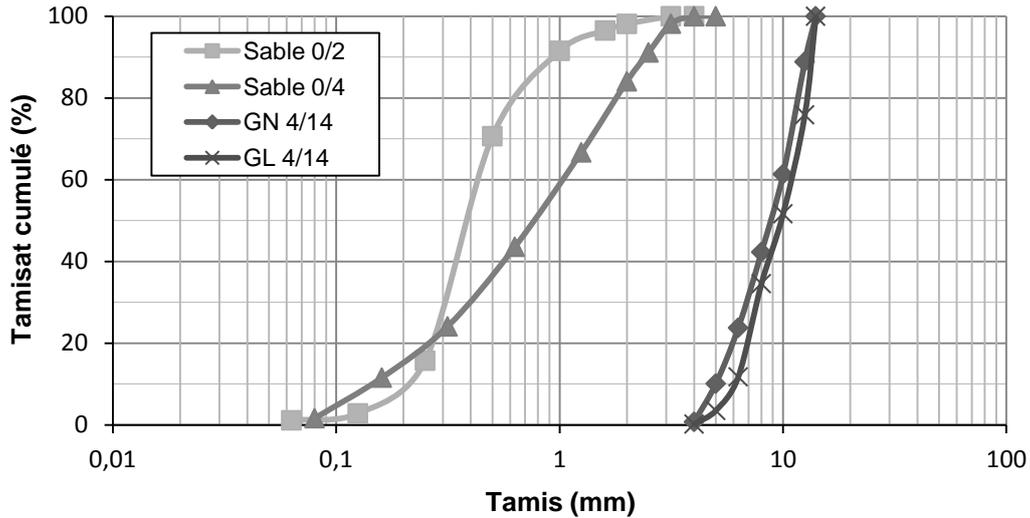


Figure II.1. Courbe granulométrique des granulats

3. MÉTHODE DE FORMULATION, CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

3.1. Procédure de formulation des BAPN

L'approche de formulation qui a servi à la confection du béton autoplaçant à base de granulats naturels (BAPN) de cette étude est empirique basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant sur les recommandations de l'AFGC (AFGC, 2008) :

Le dosage en ciment est fixé en fonction de la classe de résistance visée qui est la classe C 30/37, ce dosage est de 350 kg/m^3 en respectant les normes en vigueur (NF EN 206-1, 2012).

- Le volume de pâte retenu est de 330 à 400 litres/m^3 , permet de favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant les frottements entre les granulats ;
- Le dosage en fluidifiant est déterminé de façon expérimentale, sur la base d'essais d'étalement sur béton, de telle sorte que lorsqu'on varie le dosage en adjuvant, on obtient un étalement supérieur ou égal à 650 mm ;
- La quantité de particules inférieures à $125\mu\text{m}$ (ciment compris) doit être de l'ordre de 500 kg/m^3 . Le dosage retenu en filler calcaire est de 180 kg/m^3 , pour un liant équivalent constant est égale a 395 kg/m^3 , sachons que le coefficient d'activité (k) du filler calcaire est de $0,25$;
- L'optimisation du squelette granulaire a été réalisée à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse avec la prise d'un rapport G/S (proche de 1).

3.2. Procédure de formulation des BAPL

La méthode de formulation choisie est tirée des travaux de Bello (Bello, 2014), c'est une méthode itérative qui consiste à déterminer les quantités relatives des constituants du béton à partir de cinq paramètres que sont :

- le volume de pâte V_p qui pilote l'ouvrabilité du béton. Le volume de pâte est compris entre 350 et 450 l/m³ de béton pour garantir le caractère autoplaçant du béton. Plus l'étalement visé est grand plus grand sera le volume de pâte ;
- la concentration de liant ω_c qui guide la résistance du mortier et par suite la résistance du béton. Ce paramètre varie entre 0,35 et 0,5 pour couvrir la gamme de résistances souhaitée. La concentration de liant croît avec la résistance du béton ;
- le rapport volumique gravillon/sable V_g/V_s qui pilote en partie la masse volumique réelle du béton et qui définit la proportion relative des constituants granulaires. Ce rapport est arbitrairement pris entre 0,7 et 1,1. A volume de pâte constant, plus le rapport V_g/V_s est élevé plus la masse volumique réelle du béton est faible ;
- la proportion volumique d'addition calcaire dans le liant ρ_f qui permet de limiter le dosage en ciment et de contrôler les propriétés mécaniques et élastiques du mortier de sable normal. Elle est prise entre 0,2 et 0,3 ;
- le volume d'air occlus pris arbitrairement égal à 2 % du volume de béton.

3.2.1. Les étapes de calcul

La méthode est basé sur le choix des constantes d'entrée et sur les variables d'entrée comme suit :

Les constantes d'entrée :

- la proportion de filler $\rho_f = \frac{V_f}{V_c + V_f}$ dont les valeurs sont choisies entre 0,2 et 0,35 ;
- le rapport gravillons/sable $\frac{V_g}{V_s}$ choisi arbitrairement entre 0,7 et 1,1 ;
- le volume d'air occlus V_p pris égal à 2 % du volume du béton.

Choix des variables d'entrée V_p et ω_c :

Selon Bernier (Bernier, 2009), c'est la quantité de pâte qui conditionne l'ouvrabilité. Partant de ce constat, le volume de pâte V_p est associé au niveau de serrage susceptible d'assurer l'autoplaçabilité et la stabilité du béton léger. Pour les BAP légers identifiés dans la littérature, le volume de pâte est compris entre 350 et 450 l/m³ de béton. Selon la classe d'étalement visée, V_p sera plus proche de 350 ou de 450 l/m³. À dosage de superplastifiant

équivalent, plus le volume de pâte est grand plus le niveau de serrage du béton frais diminue. Dans les systèmes peu adjuvés, plus l'étalement visé est important plus grande sera la valeur du volume de pâte V_p . Pour être cohérent vis-à-vis des formules de l'industrie du béton, le volume de pâte des BAPL proposées est choisi dans une gamme comprise entre 350 et 450 l/m³.

De même, Bernier (Bernier, 2009), rapporte que c'est la qualité de la pâte qui contrôle la résistance de la pâte et du mortier normal. La qualité de la pâte est donnée par la concentration du liant ω_c qui exprime le rapport du volume de liant sur le volume de pâte par la relation ci-dessous :

$$\omega_c = \frac{V_l}{V_l + V_e + V_a} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

V_l : volume de liant,

V_e : volume d'eau,

V_a : volume d'air occlus.

Sur la base des données de synthèse relatives aux propriétés de BAPL présentées par (Papanicolaou et Kaffetzakis, 2011) pour une gamme de résistance moyenne à la compression comprise entre 30 et 60 MPa, la valeur de la concentration de liant est prise entre 0,35 et 0,50. Le paramètre ω_c est inversement proportionnel au rapport E_{eff}/L . Pour des résistances élevées c'est à-dire des rapports E_{eff}/L faible, la concentration de liant ω_c est plus élevée.

Dosage des constituants :

Cette étape consiste à exprimer le dosage de chacun des constituants à partir des constantes d'entrée et des variables d'entrée choisies au cours des deux premières étapes.

a) Volume des granulats

A partir du volume de la pâte V_p , les volumes respectifs de sable et de gravillons sont calculés respectivement par les équations (II.2) et (II.3).

$$V_s = (1000 - V_p) \frac{1}{1 + \frac{V_g}{V_s}} \quad (\text{II.2})$$

$$V_g = (1000 - V_p) \frac{\frac{V_g}{V_s}}{1 + \frac{V_g}{V_s}} \quad (\text{II.3})$$

b) Volume du liant

En partant de $0,35 < \omega_c < 0,50$, on détermine le volume de ciment et de filler respectivement par les équations (II.4) et (II.5).

$$V_c = (1 - \rho_f)V_p \omega_c \quad (\text{II.4})$$

$$V_f = \rho_f V_p \omega_c \quad (\text{II.5})$$

c) Volume d'eau efficace

Le volume d'eau est déduit des calculs précédents. Il s'exprime par la relation (II.6).

$$V_{eff} = V_p (1 - \omega_c) - V_a \quad (\text{II.6})$$

d) Superplastifiant

L'adjuvantation du béton est ajustée expérimentalement au cours du malaxage pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

3.2.2. Mise en œuvre de la méthode

En fixant la proportion de filler calcaire dans le liant ρ_f , le volume d'air dans le béton V_a et le rapport volumique V_g/V_s , le choix des paramètres itératifs que sont le volume de pâte V_p et la concentration de liant ω_c permet de faire tourner l'outil de calcul et de proposer une formule de composition. Pour un volume de pâte donné, il existe un nombre fini de concentrations de liant. Il faut donc trouver par des itérations, la concentration de liant qui satisfasse à la condition de résistance associée à ce volume de pâte. Le tableau II.7 présente les données d'entrées et paramètres itératifs.

Tableau II.7. Paramètres d'entrée de l'outil de calcul

Constantes d'entrée			Paramètres itératifs	
ρ_f	V_g/V_s	V_a	V_p	ω_c
0.33	1	0.02	415	0.47

Le tableau II.8. Résume l'ensemble des formulations étudiées dans ce travail.

Tableau II.8. Composition des mélanges

BAP	C	FC	E_{eff}	Eau totale	V/ pâte	SP (1 %)	E_{eff}/C	E_{eff}/L	V_g/V_s	Sable 0/2	Sable 0/4	GN 4/14	GL 4/14	Observation visuelle de l'étalement
Unité	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	l/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
BAPN	350	180	189	189	387	5,3	0,54	0,36	0.95	269.4	525.9	799.3	-	Homogène et stable
BAPL N°1	350	180	189	209.4	387	5.3	0.54	0.36	1	269,4	525.9	-	384.6	Ségrégation visuelle
BAPL N°2	408	156,8	192	212.4	400	5.65	0.47	0.34	1	255,8	496,5	-	384	Ségrégation visuelle
BAPL N°3	423,3	162,7	200	219.9	415	5.86	0.47	0.34	1	249,4	484,1	-	374,4	Ségrégation visuelle
BAPL N°4	423,3	181,1	193	212.9	415	5.86	0.46	0.32	1	249,4	484,1	-	374,4	Homogène et stable

GN : granulats naturels

GL : granulats légers d'argile expansée

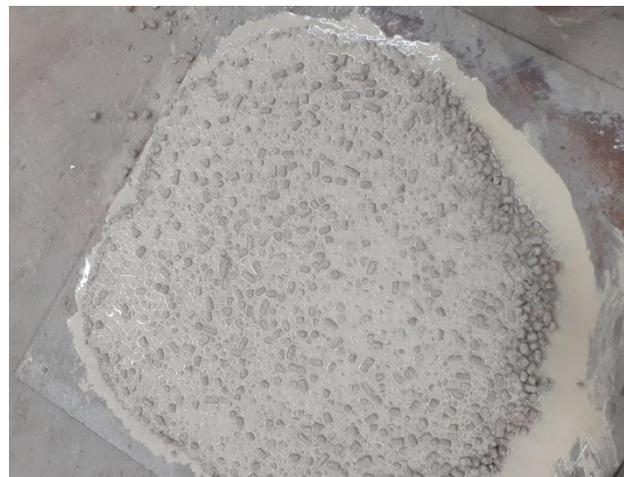
La principale contrainte rencontrée lors de la formulation des BAPL réside dans la légèreté des granulats légers et par la même occasion cette propriété est l'une de leurs principales avantages. En général, les bétons incorporant des granulats légers ont une forte propension à la ségrégation en raison du contraste de densité pâte/granulats (Kim et al., 2010). Cette singularité augmente le risque de ségrégation durant le malaxage, le transport et la mise en place du béton léger frais (Chia et al., 2005). Elle est d'autant présente qu'il s'agit de BAPL. Même si, l'auto compactibilité des BAP tend à diminuer le risque de séparation entre la matrice et les granulats pouvant subvenir lors de la vibration, elle n'assure pas pour autant l'homogénéité ni la stabilité du mélange à l'état frais en particulier des BAPL selon (Uygunoglu, 2008) et (Wu et al., 2009). La ségrégation dynamique ou statique se caractérise par une séparation pâte/granulats marquée par une orientation préférentielle des granulats légers vers la face de coulage (Neville, 1995) et (Wall, 2005).

Les BAPL N° 1, 2 et 3 présentent des signes de ségrégation visuelle. L'observation de la galette d'étalement a permis de détecter les premiers signes de ségrégation du béton en notant particulièrement :

- la concentration des gravillons au centre de la galette (Figure II.2-a) ;
- la présence d'un anneau de laitance en périphérie (Figure II.2-b).



a- Amoncèlement de granulats au centre de la galette



b- Apparition d'une auréole de laitance à la périphérie

Figure II.2. Observations visuelles tirées de l'essai d'étalement d'un BAPL

L'optimisation du volume de pâte pour limiter le risque de blocage des granulats légers et l'augmentation de la concentration volumique en solides pour l'optimisation de la viscosité de la pâte afin de limiter les risques de ségrégation ont permis d'obtenir un BAPL stable et homogène (voir tableau II.8, formulation N°4).

3.3. Séquences de malaxage des bétons

Le malaxage des bétons a été fait dans une bétonnière électrique à axe incliné (Figure II.3), de capacité 30 litres, au laboratoire de génie civil de l'université d'Annaba. La séquence de malaxage diffère entre le BAPN et le BAPL en particulier par rapport à la séquence d'introduction des granulats d'argile expansée. En générale les granulats légers sont introduit à la fin du malaxage afin d'éviter leur fragmentation dans la bétonnière sous l'effet du poids des autres constituants et de la rotation lors du malaxage. Les tableaux II.9 et II.10 présente respectivement la séquence et durée de malaxage des BAPN et BAPL.

Tableau II.9. Séquence et durée de malaxage du BAPN

Durée	Etape
t 90 s	Introduction des différentes fractions du squelette granulaire dans la bétonnière et malaxage à sec pendant 60s, suivi de l'ajout des fines (ciment et addition) et un malaxage de 30s
t 120 s	Introduction de 2/3 d'eau.
t 30sec	Arrêt du malaxage et raclage de la cuve et des palettes afin de ramener le mortier collé, dans la masse du béton.
t 60 s	Introduction de 1/3 d'eau restante dans laquelle la totalité du superplastifiant est diluée.

Tableau II.10. Séquence et durée de malaxage des BAPL

Durée	Etape
t 60 s	Introduction des deux fractions du sables ainsi que le ciment et le filler calcaire et malaxage à sec pendant 60s (couvrir la bétonnière durant cette étape).
t 60 s	Introduction de 2/3 d'eau.
t 30sec	Arrêt du malaxage et raclage de la cuve et des palettes afin de récupérer le mortier collé et le ramener au centre de la cuve.
t 60 s	Introduction des granulats d'argile expansé.
t 120 s	Introduction de 1/3 d'eau restante dans laquelle la totalité du superplastifiant est diluée.

3.4. Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont coulées dans des moules métalliques sans vibration. En effet, le BAP est capable de s'écouler sous son propre poids. Pour cela, on utilise des moules de dimensions :

- Cubiques (10 x 10 x 10) cm destinés pour les essais de compression ;

- Cylindriques (11 x 22) cm destinés pour être scié en deux dans le sens du coulage afin de visualiser l'homogénéité du matériau après la mise en place.

Le démoulage s'effectue après 24h ±4h et les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'au échéances des essais de caractérisation à l'état durci.

4. ESSAIS RÉALISÉS SUR LES BAP

4.1. A l'état frais

4.1.1. Essai d'étalement (flow test)

L'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams (Figure II.3), permet de mesurer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle. Le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à humidifier légèrement la plaque puis, à placer le cône au centre de la plaque, le maintenir fermement s'il n'est pas auto-stable. Remplir, le cône en une seule fois à l'aide d'un seau et soulever le cône de manière régulière et sans coups. Enfin on mesure le diamètre moyen de la galette d'étalement (Figure II.4) obtenue (2 mesures correspondant à 2 diamètres perpendiculaires). Plus le diamètre est grand, plus le matériau est fluide.

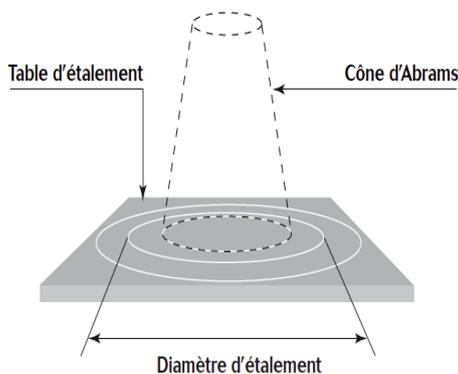


Figure II.3. Essai d'étalement au cône d'Abrams



Figure II.4. Mesure du diamètre d'étalement au cône d'Abrams

Cet essai peut éventuellement être associé à une mesure du temps écoulé pour obtenir un étalement de 50 Cm (T_{50}), ce qui fournit une indication sur le caractère visqueux du matériau. Selon la norme(NF EN2069,10). Il existe trois classes d'étalement définies comme suit :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 à 650mm,
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 à 750mm,

- Classe SF3 : étalement compris entre 760 à 850mm.

4.1.2. Essai à la boîte en L (L-Box test)

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement ferraillée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L (Figure II.5). Il permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.



Figure II.5. Essai à la boîte en L (L-Box test).

La méthode consiste en premier à humidifier la boîte en L, après à remplir de BAP (environ 13 litres) la partie verticale de la boîte (hauteur de 600 mm), puis en levant une trappe, le béton s'écoule dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure) (Figure II.6). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H_1) et horizontale (H_2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H_2/H_1 . Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

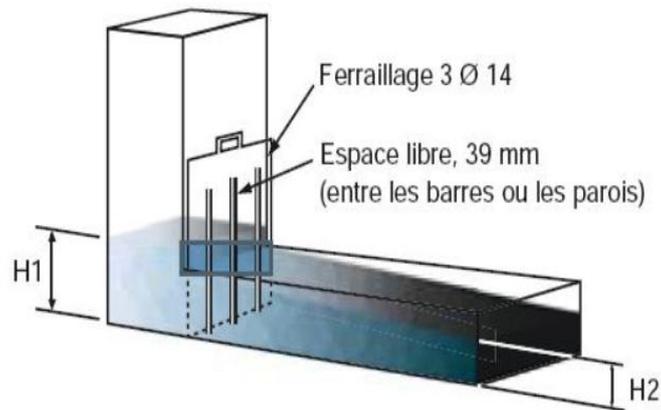


Figure II.6. Schéma de la boîte en L (L-Box test).

4.1.3. Essai de stabilité au tamis

La stabilité a été mesurée par l'essai de la stabilité au tamis (Figure II.7). Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation « statique » et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.



Figure II.7. Essai de stabilité au tamis.

Un échantillon de 10 L de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4.8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'équation (éq II.7) :

$$\pi = \frac{P_{\text{laitance}} \times 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- π : Pourcentage de stabilité.
- P_{laitance} : Pesée de laitance.
- $P_{\text{echantillon}}$: Pesée d'échantillon.

4.2. Résistance à la compression

Les essais de la résistance à la compression sont effectués, conformément à la norme (NF EN 12390, 04), par écrasement des éprouvettes cubiques à différentes échéances 2, 7 et 28 jours (figure II.8). Les résultats sont obtenus par la moyenne de trois éprouvettes testées. La machine utilisée est une presse hydraulique d'une capacité de 2000 KN. La résistance à la compression est donnée par (eq II.8) ;

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- σ : Contrainte de rupture (MPa).
- P : Charge de rupture (N).
- S : Section de l'éprouvette (mm²).

Pour cet essai plusieurs conditions doivent être remplies :

- Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être bien planes, et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette ;
- La ligne d'application de la force doit coïncider avec l'axe de l'éprouvette ;
- La vitesse de la force d'application doit croître régulièrement, afin d'éliminer les effets de chocs et de fluage.



Figure II.8. Essai de compression

5. CONCLUSION

Afin de mettre en évidence l'effet du degré de saturation des granulats légers d'argile expansée sur les propriétés des BAP à l'état frais et durci, une caractérisation complète des matériaux et une mise en place de procédures expérimentales s'est avérée nécessaire. Ce présent chapitre a été consacré à cet effet, dans lequel, nous avons exposé les différents matériaux utilisés pour l'élaboration de cette étude ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Il a été de même des méthodes de fabrication et des séquences de malaxage des différents mélanges utilisés.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats et discussions qui ont été obtenus suite à l'étude de l'effet du degré de saturation des granulats légers d'argile expansée sur les propriétés des bétons autoplaçants légers à l'état frais et durci.

Sommaire

1. INTRODUCTION	43
2. CINETIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS LEGERS	43
3. CARACTERISATION A L'ETAT FRAIS	44
3.1. L'étalement au cône d'Abrams.....	45
3.2. Temps d'étalement (T ₅₀)	46
3.3. Ecoulement à la Boite en L	47
3.4. Stabilité au tamis	48
3.5. Observation visuelle de l'homogénéité des BAPL sur éprouvette durci	50
3.6. Mesures de la masse volumique sur béton frais	51
4. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT DURCI	52
5. CONCLUSION	53

Chapitre III Résultats et discussions

1. INTRODUCTION

Après l'étude des différentes caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques du ciment, fines et granulats utilisés (granulats naturels et granulats légers), on traitera dans ce chapitre l'effet du degré de saturation des granulats légers d'argile expansée sur les propriétés des BAP.

La présence d'un granulats poreux sec dans la pâte de ciment modifie non seulement le rapport E/C mais aussi réduit le volume du mélange en enlevant de l'eau à la pâte au cours de la période dormante. Ce transfert d'eau de la pâte vers le granulats provoque un raidissement précoce préjudiciable à la mise en œuvre du matériau. Dans le cas des BAPL, ce phénomène peut contrarier le caractère autoplaçant du béton et limiter l'aptitude au remplissage du matériau. Pour cela, cinq états de saturation du granulats léger sont expérimentés :

- l'état sec obtenu après séchage à l'étuve à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante ;
- l'état humide sec en surface après prémouillage à 5 minutes à partir d'une quantité d'eau correspondant à l'absorption dans l'eau à 24 heures ;
- l'état saturé sec en surface après immersion dans l'eau à pression atmosphérique pendant 5 minutes ;
- l'état saturé sec en surface après immersion dans l'eau à pression atmosphérique pendant 2 heures ;
- l'état saturé sec en surface après immersion dans l'eau à pression atmosphérique pendant 24 heures.

2. CINÉTIQUE D'ABSORPTION DES GRANULATS LEGERS

L'étude de la cinétique d'absorption d'eau des granulats légers d'argile expansée permet de déterminer l'évolution de l'absorption d'eau des granulats depuis l'état initial sec jusqu'à l'état final saturé avec la méthode de pycnomètre. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.1.

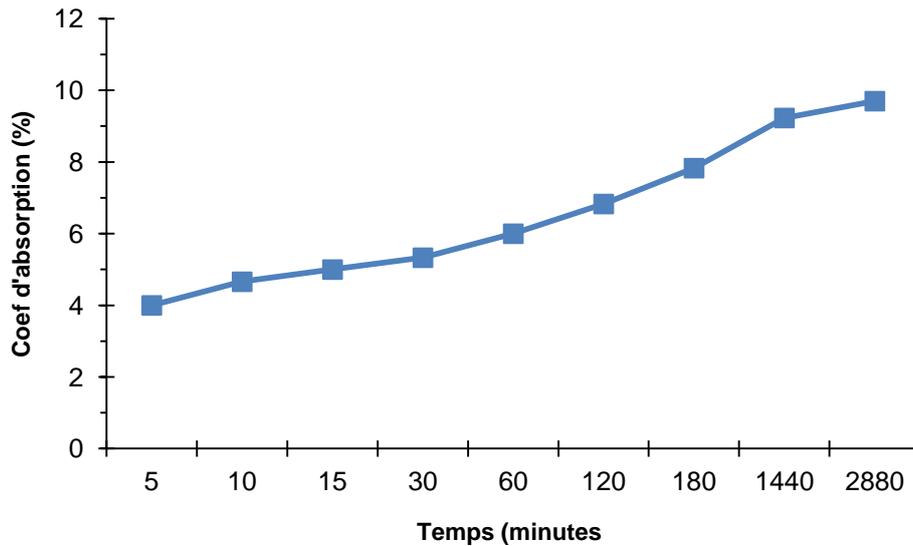


Figure III.1. Cinétique d'absorption des granulats légers d'argile expansée

D'après ces résultats on constate que le coefficient d'absorption des granulats d'argile expansée augmente proportionnellement avec le temps d'immersion dans l'eau. Les coefficients d'absorption à 24 et 48 heures, correspondent respectivement à 9,23% et 9,7%. Cependant, la valeur d'absorption obtenue à 24 heures est inférieure à ceux trouvés dans la littérature. En effet, les travaux de Castro et al. (Castro et al., 2011) sur des granulats d'argile expansée montrent que l'absorption à 24 heures se trouve entre 15 et 31 % en masse.

Pour la suite du travail le coefficient d'absorption à 24 heures a été retenu pour le prémouillage des granulats légers.

3. CARACTERISATION À L'ÉTAT FRAIS

La caractérisation des BAPL au même titre que les BAPN passe par la détermination des propriétés génériques que sont :

- la capacité de remplissage qui donne l'aptitude du mélange à se mettre en place sous l'effet de sa gravité et à remplir le volume offert ;
- la capacité de passage qui détermine l'aptitude du matériau à résister au blocage dans un milieu confiné ;
- la résistance à la ségrégation qui évalue la capacité du mélange à résister à une séparation entre les phases sous l'effet d'interactions dissipatives.

Les propriétés à l'état frais sont déterminées à partir d'essais d'écoulement et d'essais de résistance à la ségrégation. Les essais d'écoulement tels que l'étalement au cône, le temps de

passage à l'entonnoir en V et le taux de remplissage à la boîte en L permettent d'évaluer la capacité de remplissage et de passage. Les essais de stabilité tels que l'essai au tamis permet de caractériser la résistance à la ségrégation du béton. Les essais de caractérisation ont été effectués selon les procédures décrites au chapitre II.

3.1. L'étalement au cône d'Abrams

L'essai d'étalement permet de mesurer la mobilité du BAP en l'absence d'obstacles, l'étalement peut être déterminé selon la norme NF EN 12350-8. La figure III.2 présente l'influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur l'étalement des BAPL.

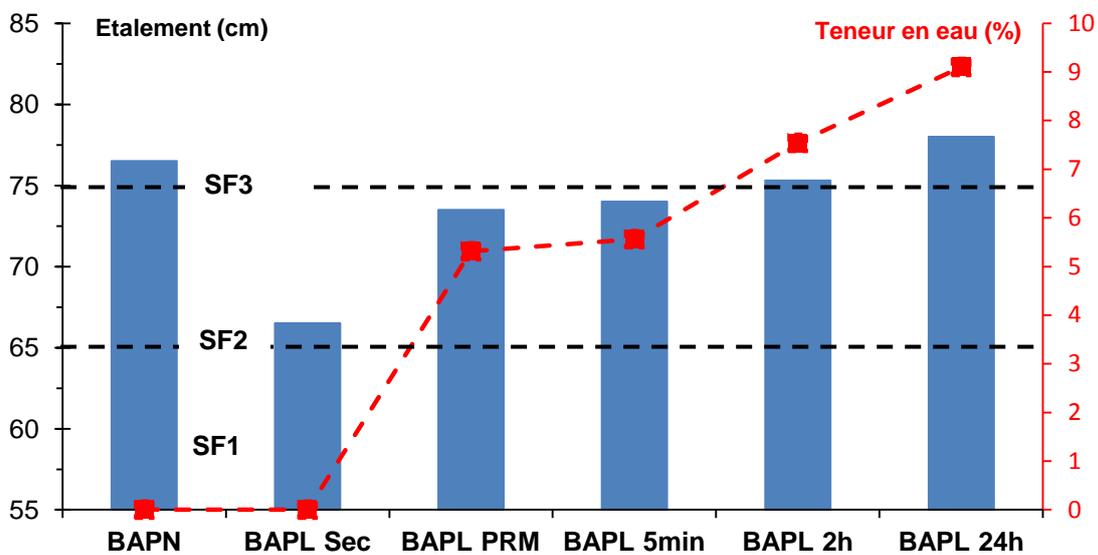


Figure III.2. Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur l'étalement des BAPL

Nous constatons que pour l'ensemble des BAPL, l'étalement se trouve dans la plage de référence qui est entre 55 et 85 cm et malgré la présence de granulats légers poreux et cela quelque soit l'état de saturation des granulats. Le BAPL fabriqué à partir de granulats sec enregistre l'étalement le plus faible, principalement dû au transfert d'eau de la pâte fraîche vers le granulat léger, induisant ainsi un raidissement précoce du béton dans le malaxeur et une augmentation de la cohésion du matériau (Bello, 2014). Le prémouillage ou la saturation des granulats d'argile expansée améliorent l'étalement des BAPL par rapport au BAPL avec granulats sec. Introduire des granulats légers lors du malaxage avec une certaine teneur en eau va limiter l'absorption d'eau dans la pâte de ciment au cours du malaxage et lors de la mise en place du béton. En effet, la courbe en rouge dans la figure III.2 représente l'évolution de la teneur en eau des granulats d'argile expansée pour les différents mode d'humidification des granulats légers. D'après la figure III.3 qui représente la relation entre l'étalement et la teneur

en eau, on constate qu'il existe une bonne corrélation (avec un coefficient de corrélation de 0,99) entre la teneur en eau des granulats légers et l'étalement des BAPL. Une partie de l'eau absorbée par les granulats légers va être restituée dans le mortier ce qui va contribuer à une meilleure humidification du mélange ce qui se traduit par une amélioration de l'étalement.

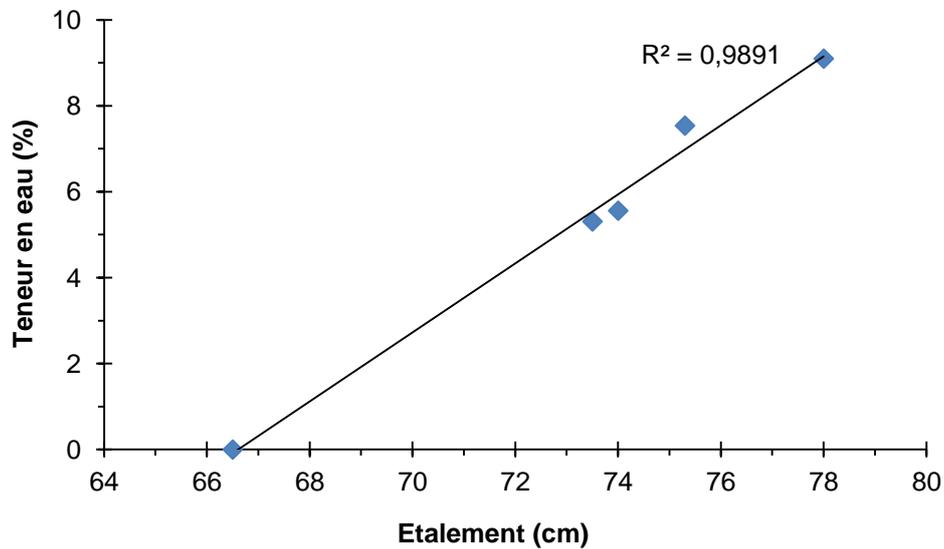


Figure III.3. Corrélation entre l'étalement des BAPL et la teneur en eau des granulats d'argile expansée

Hubertova et Hela (Hubertova et Hela, 2007) ont observé l'influence de la pré-humidification sur l'écoulement et le maintien de rhéologie des BAPL. L'étude comparative a porté sur les propriétés à l'état frais de deux types de BAP de granulats légers d'argile expansée dont l'un incorpore les gravillons secs et l'autre des gravillons pré-humidifiés. Les résultats montrent que la pré-humidification des granulats d'argile expansée a favorisé l'écoulement et le maintien de rhéologie du BAPL. Les résultats de Cauberg et Kestemont (Cauberg et Kestemont, 2009) sur la formulation de BAPL d'argile expansée ont montré que le pouvoir absorbant des granulats légers est significativement réduit lorsque l'essai d'absorption d'eau est réalisé avec des granulats d'argile expansée de teneur en eau initiale comprise 15 et 20 % en masse.

3.2. Temps d'étalement (T_{50})

Le temps T_{50} est réalisé conjointement avec l'essai d'étalement, il correspond au temps que met la galette de béton pour atteindre un étalement de 50 mm. Il nous renseigne sur la vitesse de déformation du béton, mais aussi sur la viscosité apparente du béton qui est plus grande que le temps d'étalement est grand. La figure III.4 représente l'évolution du T_{50} des BAPL en fonction du degré de saturation des granulats d'argile expansée.

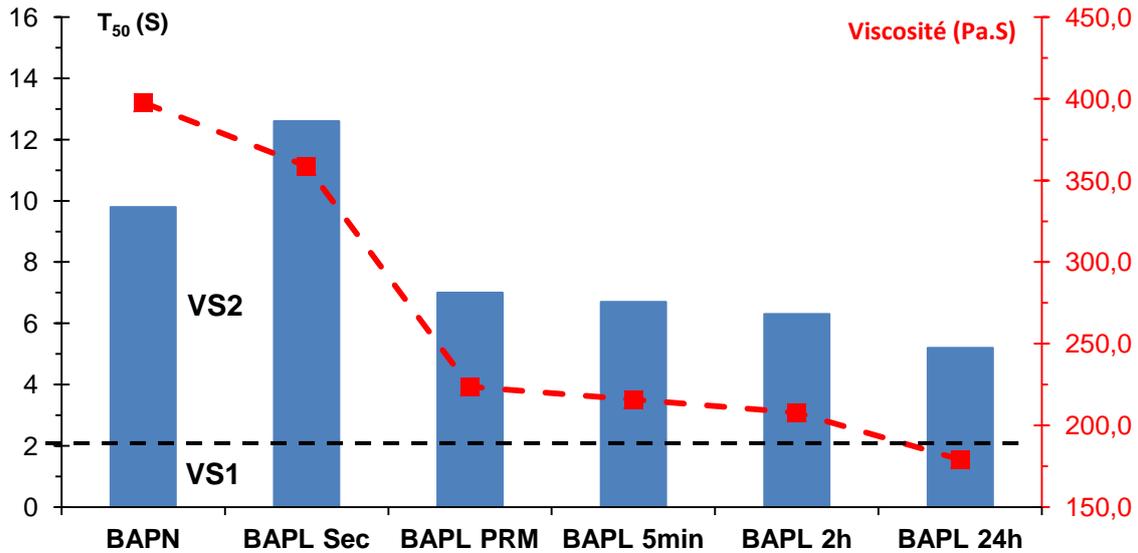


Figure III.4. Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur le T_{50} des BAPL

On constate d'après la figure III.4 que l'ensemble des mélange répondent à la classe VS2 selon la norme NE EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010). L'augmentation de la teneur en eau des granulats légers réduit le temps d'étalement des BAPL et par la même occasion la viscosité apparente obtenue par corrélation du T_{50} selon le modèle de Sedran (Sedran, 1999) présentée sur la figure III.3 en rouge. Une partie de l'eau absorbée par les granulats légers va être restituée dans le mortier ce qui va fluidifier d'avantage le mélange, plus la quantité d'eau absorbée est importante est plus le béton va être plus fluide et moins visqueux. Le BAPL à base de granulats légers sec enregistre un T_{50} et une viscosité les plus important de la série, du fait qu'une partie de l'eau de gâchage a été absorbé par les granulats lors du malaxage.

3.3. Ecoulement à la Boite en L

La fluidité pour un béton autoplaçant n'est pas la seule condition à vérifier, en effet, un BAP doit pouvoir passer à travers un ferrailage plus ou moins dense sous l'effet unique de son propre poids. Afin de caractériser la capacité de passage, un essai à la boite en L avec une configuration à trois barres a été appliqué à l'ensemble des mélanges. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.5.

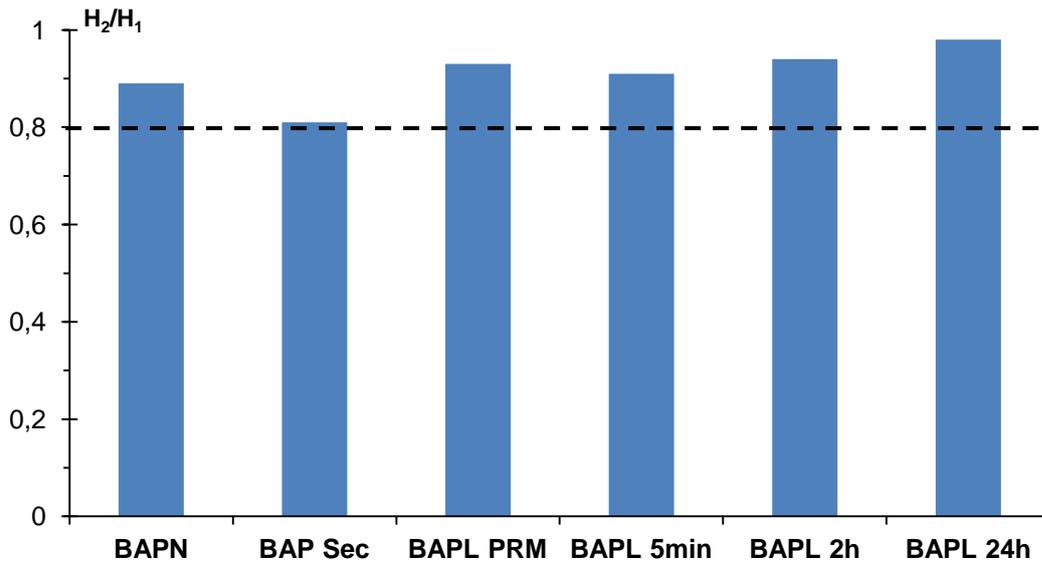


Figure III.5. Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur l'écoulement à la boîte en L des BAPL

La capacité de passage à la boîte en L des différents mélanges est présentée sur la figure III.5, l'ensemble des BAPL ont un taux de remplissage supérieur à 80%. Le BAPL à base de granulats sec enregistre un taux de remplissage de 81% à la limite de la valeur recommandée par la norme, résultat d'un blocage dans la boîte en L. En effet, le mortier de ce dernier est trop visqueux rendant la déformabilité du béton en milieu confiné assez difficile en plus de la présence d'une ségrégation dynamique du béton. L'augmentation de la teneur en eau des granulats d'argile expansée améliore l'aptitude à l'écoulement des BAPL en comparaison avec le BAPL à base de granulats sec. Le fait de pré mouiller ou bien de saturer les granulats d'argile expansée permet d'éviter que le granulat n'absorbe pas une partie de l'eau de gâchage. Et ainsi, le BAPL est suffisamment fluidifié est permet un meilleur remplissage de la boîte en L. Néanmoins, à forte teneur en eau, les granulats restituent une quantité supplémentaire en eau (qui a été absorbée) dans le mortier et cela peut nuire à la résistance à la ségrégation dynamique du BAPL.

3.4. Stabilité au tamis

La ségrégation est un paramètre très important pour la validation d'un BAP. Pour les BAPL, il faut un seuil de cisaillement suffisamment faible pour assurer l'écoulement du matériau et une viscosité suffisamment grande pour maintenir les granulats légers dans la pâte et préserver de la ségrégation. Les résultats de la stabilité au tamis qui caractérise la ségrégation des BAPL sont présentés sur la figure III.6.

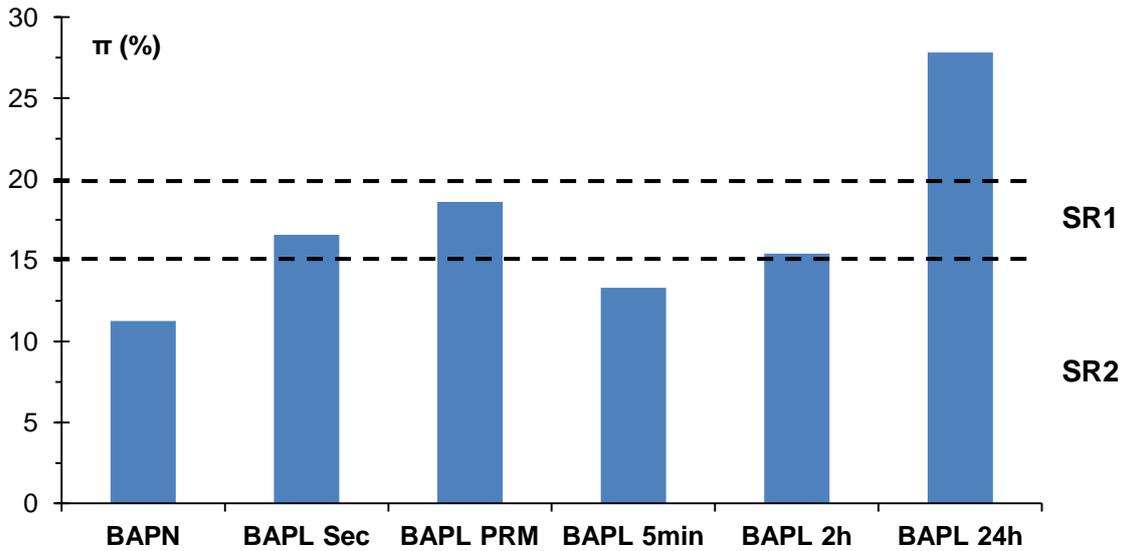


Figure III.6. Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur la stabilité au tamis

La stabilité au tamis d'un BAP représente la quantité de laitance dans le béton. D'après la figure III.6 on constate que l'ensemble des mélanges satisfait au critère de ségrégation exigé par la norme à l'exception du BAPL 24h qui enregistre un pourcentage de laitance supérieur à 20%. En effet, les données tirées de (Papanicolaou and Kaffetzakis 2011) indiquent que le volume de pâte dans les formules de BAPL se situe entre 350 et 420 l/m³ et qui est donc au-delà des 350 l/m³ admis pour les BAPN dans l'industrie du béton. La stabilité des BAPL conduit généralement à une quantité de fines plus importante pour adapter la viscosité de la pâte et améliorer la cohésion entre la pâte et les granulats légers. Ainsi, la mise en œuvre de l'essai de stabilité au tamis conduit à un pourcentage de laitance plus élevé qui ne satisfait pas au critère de ségrégation exigé.

L'augmentation de la teneur en eau des granulats légers réduit la résistance à la ségrégation des BAPL, cela est remarquable pour les BAPL dont les granulats légers ont subies une saturation dans l'eau. Durant le malaxage des bétons, une partie de l'eau absorbé par les granulats légers lors de la saturation, va être distribuée à nouveau dans le mélange et va engendrer deux cas de figures. Le premier cas de figure est une augmentation du volume de la pâte liée à l'augmentation de la quantité d'eau totale ce qui provoque une plus grande quantité de laitance lors de l'essai de stabilité. Le deuxième cas de figure est une diminution de la viscosité des bétons qui s'accompagne par une diminution de la résistance à la ségrégation.

3.5. Observation visuelle de l'homogénéité des BAPL sur éprouvette durci

L'essai de fendage est réalisé sur des éprouvettes cylindrique de 11 x 22 cm de BAPL afin de visualiser l'homogénéité du matériau après la mise en place du béton. Au bout de 28 jours de cure dans l'eau, les cylindres sont scié en deux suivant le sens de coulage à la suite, les éprouvettes sciées sont disposées verticalement de haut en bas et photographiées. La figure III.7 montre la répartition des gravillons légers dans la matrice cimentaire pour les différentes BAPL.



BAPL Prm



BAPL 5 Min



BAPL 2H



BAPL 24H

Figure III.7. Distribution des gravillons dans les BAPL

D'après la figure III.7 on observe dans les BAPL Prm, 2H et 24H une séparation de la matrice cimentaire des granulats légers, étant donné leurs légèretés, les granulats d'argile expansée remonte à la partie supérieure, tandis que la pâte repose au fond. Cette séparation est un signe d'une ségrégation du béton. Cependant, pour le BAPL 5min, la distribution des gravillons légers est plus uniforme avec tout de même une légère quantité de pâte qui repose au fond. Cette observation corrobore les constats trouvés à l'état frais et souligne l'importance des observations visuelles pour ce type de béton.

3.6. Mesures de la masse volumique sur béton frais

La figure III.8 présente la masse volumique réelle des BAP de notre étude.

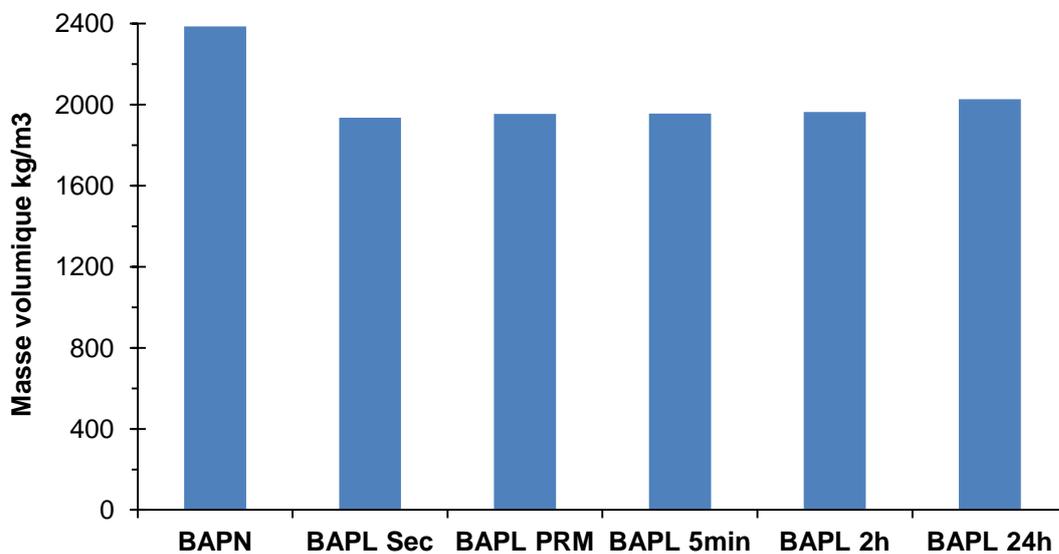


Figure III.8. Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur la masse volumique des bétons

D'une manière générale, le degré de saturation des granulats légers d'argile expansée affecte très sensiblement la masse volumique des BAPL, une très légère variation des masses volumiques est constatée elle est due à la différence entre les teneurs en eau des granulats des différents mélanges. Cependant, par rapport au BAPN, les masses volumiques des BAPL sont moindres, avec en moyenne une réduction de poids propre de l'ordre de 20 %. Par ailleurs, la diminution du poids des éléments préfabriqués facilite les opérations de transport et de manutention ainsi que la pose. Il intervient également directement sur le dimensionnement et donc sur le coût des fondations des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Rappelons enfin que les BAPL de cette étude sont des bétons légers de structure et non pas des bétons légers isolants, d'où la masse volumique qui varie entre 1200 et 2000 kg/m³ (Bello, 2014).

4. CARACTÉRISATION À L'ÉTAT DURCI

Le comportement à l'état durci se rapporte essentiellement aux résistances à la compression à 2, 7 et 28 jours. La figure III.9 présente la résistance mécanique à la compression des bétons aux différentes échéances.

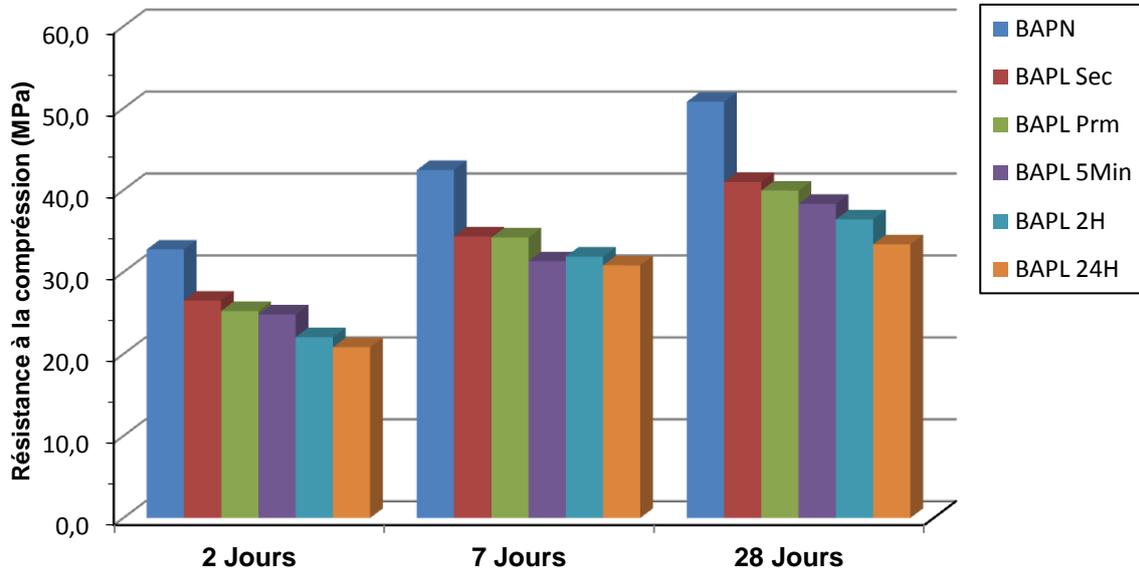


Figure III.9. Influence du degré de saturation des granulats d'argile expansée sur les résistances mécaniques en compression

D'après la figure III.9 on constate une diminution des résistances mécaniques en fonction de l'augmentation de la teneur en eau des granulats d'argile expansée et cela pour les différentes échéances. Les propriétés mécaniques des bétons légers sont intimement liées aux performances mécaniques et élastiques des granulats légers utilisés (Zhang and Gjorv 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, ce qui est le cas de nos BAPL.

La diminution des résistances en fonction de la teneur en eau s'explique par le fait qu'une partie de l'eau absorbée par les granulats légers va migrer dans le mortier ce qui va augmenter le rapport de l'eau totale sur le dosage en ciment, par conséquent, plus la teneur en eau est grande est plus le rapport (E_{totale}/C) est important. Le résultat de cette augmentation s'accompagne par une augmentation de la porosité du béton, une diminution de la compacité et une mauvaise homogénéité qui apparaisse sous forme d'une ségrégation.

5. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus au cours de cette étude, nous pouvons tirer les informations suivantes :

- L'utilisation des granulats légers d'argile expansée à l'état sec réduit fortement l'étalement du béton autoplaçant, cependant, une fois pré-mouillé ou saturé, les granulats n'absorbent plus ou très peu, du moins de l'ordre des granulats naturelles ;
- L'augmentation de la teneur en eau des granulats légers réduit le temps d'étalement (T_{50}) et par la même occasion la viscosité des BAPL ce qui a comme conséquence une diminution de la résistance à la ségrégation ;
- L'utilisation des granulats légers sec réduit la capacité de remplissage des BAP en milieu confiné et en présence d'obstacles, tandis que leur utilisation avec une certaine teneur en eau améliore l'écoulement des BAPL ;
- L'essai de stabilité au tamis n'importe pas de conclusion pertinente en ce qui concerne la stabilité des BAPL, néanmoins, l'observation visuelle du fendage des éprouvettes cylindriques apporte des informations supplémentaire sur l'efficacité de la méthode de saturation des granulats légers et montre qu'une saturation à 5 min dans l'eau offre au BAPL une meilleure résistance à la ségrégation et une bonne homogénéité ;
- La teneur en eau des granulats légers affecte très peu la masse volumique des BAPL, cependant, les BAPL ont une masse volumique nettement inférieure à ceux des BAPN avec en moyenne une réduction de poids propre de l'ordre de 20 % ;
- L'augmentation de la teneur en eau des granulats légers réduit les résistances mécaniques et cela pour l'ensemble des échancres, néanmoins, les résistances obtenues sont largement acceptable.

Pour conclure, il est parfaitement faisable de fabriquer un béton autoplaçant qui respecte l'ensemble des critères d'autoplaçance avec substitution totale des granulats naturelles par des granulats légers d'argile expansée avec une saturation dans de l'eau de 5 minutes au préalable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a été réalisée sur des bétons autoplaçants légers à base de granulats légers d'argile expansée. La problématique majeure des granulats d'argile expansée réside dans leur forte absorption qui peut nuire considérablement aux propriétés rhéologiques des BAP à l'état frais. Il est connu à travers la littérature que les granulats légers sont introduit dans le béton avec une certaine teneur en eau et qu'à l'état sec, ces granulats peuvent entraîner le raidissement du mortier et par conséquent réduire l'autoplaçance des BAP. Dans ce travail, on s'intéresse à l'effet de la teneur en eau des granulats sur le comportement des BAPL à l'état frais et durci. Pour cela, plusieurs situations ont été choisies afin d'avoir différents états de saturation des granulats d'argile expansée. Les résultats obtenus lors de l'étude expérimentale amènent les conclusions suivantes :

- L'utilisation des granulats légers d'argile expansée à l'état sec réduit fortement l'étalement du béton autoplaçant, cependant, une fois pré-mouillé ou saturé, les granulats n'absorbent plus ou très peu, du moins de l'ordre des granulats naturelles ;
- L'augmentation de la teneur en eau des granulats légers réduit le temps d'étalement (T_{50}) et par la même occasion la viscosité des BAPL ce qui a comme conséquence une diminution de la résistance à la ségrégation ;
- L'utilisation des granulats légers sec réduit la capacité de remplissage des BAP en milieu confiné et en présence d'obstacles, tandis que leur utilisation avec une certaine teneur en eau améliore l'écoulement des BAPL ;
- L'essai de stabilité au tamis n'importe pas de conclusion pertinente en ce qui concerne la stabilité des BAPL, néanmoins, l'observation visuelle du fendage des éprouvettes cylindriques apporte des informations supplémentaire sur l'efficacité de la méthode de saturation des granulats légers et montre qu'une saturation à 5 min dans l'eau offre au BAPL une meilleure résistance à la ségrégation et une bonne homogénéité ;
- La teneur en eau des granulats légers affecte très peu la masse volumique des BAPL, cependant, les BAPL ont une masse volumique nettement inférieure à ceux des BAPN avec en moyenne une réduction de poids propre de l'ordre de 20 % ;

- L'augmentation de la teneur en eau des granulats légers réduit les résistances mécaniques et cela pour l'ensemble des échantillons, néanmoins, les résistances obtenues sont largement acceptables.

Pour conclure, il est parfaitement faisable de fabriquer un béton autoplaçant qui respecte l'ensemble des critères d'autoplaçance avec substitution totale des granulats naturels par des granulats légers d'argile expansée avec une saturation dans de l'eau de 5 minutes au préalable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A
AFGC, (2008). Association française de Génie Civil, Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, Paris, 2ème édition, AFGC, 64 p
Arnould M. et Virlogeux M. (1986). Granulats et Bétons Légers <i>Édition 1986, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées</i>
Arnould, M., & Virlogeux, M. (1986). Granulats et bétons légers, ed. <i>Presses Pont et Chaussées</i> .
B
Banfill, P. F. G. (2011). Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. <i>Construction and Building Materials</i> , 25(6), 2955-2960.
Bello, L. (2014). <i>Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables</i> (Doctoral dissertation, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc).
Bernier, G. (2009). <i>Formulation des bétons</i> . Ed. Techniques Ingénieur.
BRGM (1996). La diatomite dans le département du cantal : synthèse des données relatives au site de nouvelle et à l'existence de gisements régionaux potentiels.
C
Castro, J., Keiser, L., Golias, M., & Weiss, J. (2011). Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. <i>Cement and Concrete composites</i> , 33(10), 1001
Cauberg N. and Kestemont X. (2009) Lightweight self
CEB-FIB. (1977). Lightweight Aggregate Concrete, The Construction press.
CEB-FIP. (1980). Béton de granulats léger, Annales de l'ITBTP, janvier-mai et décembre.
Chia, K. S., Chen
Choi, Y. W., Kim, Y. J., Shin, H. C., & Moon, H. Y. (2006). An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high
Contant. M. (2000). Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux. Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure, L'université du Québec Edition. Montréal.
D

De Larrard F. (1999). Structures granulaires et formulation des bétons <i>Collection Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° OA 34 ; 1999.</i>
DRAN, T. (1999). Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, Thèse de doctorat, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, France.
H
Herihiri. O. (2010). Formulation et caractérisation des bétons légers, Mémoire de Génie Civil, Université Mohamed Khider Biskra.
Hubertova M. and Hela R. (2007). The effect of metakaolin and silica fume on the properties of lightweight self-compacting concrete <i>ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Warsaw 20-25 May 2007. SP-243, American Concrete Institute, pp. 35-48.</i>
K
Kaszynska M. (2010). Effect of aggregate mix composition on lightweight self-consolidating concrete <i>International Rilem Conference on Self Compacting Concrete. Canada 2010, pp. 203-210.</i>
Kim, Y. J., Choi, Y. W., & Lachemi, M. (2010). Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. <i>Construction and Building Materials, 24(1), 11-16.</i>
L
Laukaitis, A., Zurauskas, R., Keriene, J. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, <i>Cement and Concrete Composites, 27, P41-47.</i>
Lepesqueux, E. (2012). Comportement des bétons autoplaçants préparés avec des granulats légers. Library and Archives Canada Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa.
Lo, T. Y., Tang, P. W. C., Cui, H. Z., & Nadeem, A. (2007). Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self-compacting concrete. <i>Materials Research Innovations, 11(1), 45-50.</i>
M
Muller, R. (1979). Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic plus velocity measurement. <i>The International Journal of lightweight concrete 1.p87-90.</i>
N
Neville, A. M. (1995). Properties of concrete, 4th and final edition. <i>Malaysia: Longman Group Limited.</i>
NF EN 206-1, (2012). Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité.

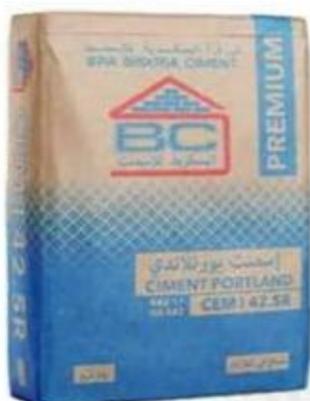
NF EN 206-9. (2010). Béton – Partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.
P
Papanicolaou, C. G., & Kaffetzakis, M. I. (2011). Lightweight aggregate self-compacting concrete: state-of-the-art & pumice application. <i>Journal of Advanced Concrete Technology</i> , 9(1), 15-29.
S
Swamy, R. N., & Lambert, G. H. (1981). The microstructure of Lytag aggregate. <i>International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete</i> , 3(4), 273-282.
U
Uygunoglu, T. (2008). <i>Properties of Self-Consolidating Lightweight Aggregate Concrete</i> (Doctoral dissertation, PhD thesis, Süleyman Demirel University in Turkish).
V
Venuat. M. (1983). Du béton mousse au béton de polystyrène.
W
Wall, J. R. (2005). Design, production and mechanical properties of expanded slate lightweight self
Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., & Ding, Y. (2009). An experimental study on the workability of self
Z
Zhang, M. H., & Gjorv, O. E. (1991). Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete. <i>Materials Journal</i> , 88(2), 150-158.
Zhutovsky, S., Kovler, K., Bentur, A. (2004). Influence of cement paste matrix properties on the autogenously curing of high-performance concrete <i>Cement and Concrete Composites</i> , 26,P499-507.

ANNEXES

Annexe - A : Fiche technique du ciment



SPA BISKRIA CIMENT



FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5R

CIMENT PORTLAND

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

CEM I 42.5R :
Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

👉 DOMAINES D'APPLICATION

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

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



✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment 	Sable (sec) 0/5 	Gravillons ^(sec) 8/15mm 15/25mm 	Eau (litre)
Dosage pour béton	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 2
	ciment 	Sable Correcteur 0/1mm 	Sable (sec) 0/4mm 	Eau (litre)
Mortier de briquetage	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 3
Mortier de finitions	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 3

Remarque: un bidon

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

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



SPA BISKRIA CIMENT
Adresse : Djar Belahrache
Branis . Biskra Algerie

Tel : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 62 73 92
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

Annexe - B : Fiche technique du filler calcaire



ALCAL UF10

Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

Caractéristiques chimiques

CaCO ₃	99,61%
CaO	55,94%
SiO ₂	0,04%
Na ₂ O	0,05%
AL ₂ O ₃	0,03%
MgO	0,20%
Fe ₂ O ₃	0,02%
K ₂ O	0,01%
P ₂ O ₅	0,01%
TiO ₂	0,01%
SO ₃	0,02%
Perte au feu	43,67%
Ph	9

Caractéristiques physiques

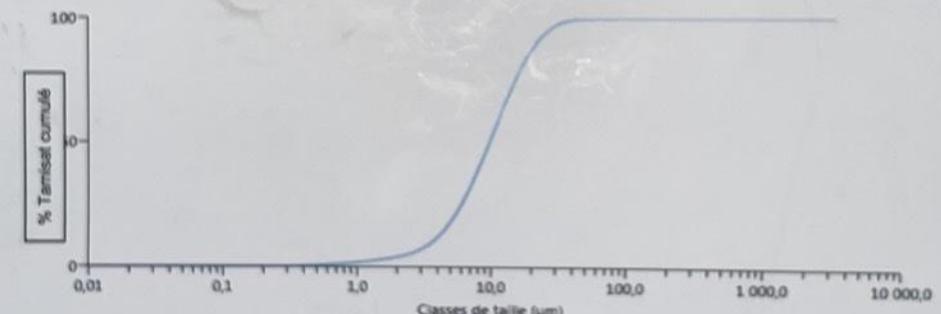
Dureté (Mohs):	3
Poids spécifique :	2,7
Densité apparente non tassée:	0,90
Blancheur (ELREPHO 070):	L* ≥ 95 ; a* ≤ 0,55 ; b* ≤ 4
Prise d'huile (NF.T 30.022):	19g/100g de poudre
Humidité à l'ensachage:	0,02%
Indice de réfraction:	1,71

Les éléments toxiques:

Cyanure	0,045 µg / gr
Mercure	0,35 µg / gr
Plomb	0,08 µg / gr
Argent	0,02mg / gr

Répartition granulométrique

Inférieur à 5µm : 19% Diamètre médian : 2,10 µm Inférieur à 40µm : 99%



Classes de taille (µm)

diffraction laser (3000)

Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

Conditionnement

Big-bag (1tonne)
Palettes houssées (48 sacs de 25kg)

Principales utilisations

- Peinture mate à phase aqueuse et phase solvant
- Peinture en poudre hydrodispersible
- Polyesters
- Colle
- Pâte à chewin-gum
- Caoutchouc
- Céramique sanitaire
- Fabrication de craie
- Pâte à modeler
- boue de forage

DG : Cité Administrative Lot N°135 Ouled Fayet- Alger - Tél : 023 29 63 37 à 40 / Fax: 023 29 63 30 /31 - Site WEB www.eng.dz
 Usine Carbonate de Calcium El -khroub W. Constantine Tél: 031 95 41 76 / 95 41 14 Fax: 031 95 41 13 E-mail : elkhroubcaco3@eng.dz | engcaco3@gmail.com

Annexe - C : Fiche technique du superplastifiant

Notice technique
Edition Octobre, 2013
Version 01,2013
POLYFLOW® LSR 8800



POLYFLOW® LSR 8800

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934.2 tab. 1.3.1 3.2

Présentation

POLYFLOW® LSR 8800 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylate. POLYFLOW® LSR 8800 ne présente pas d'effet retardateur.

Domaines d'application

POLYFLOW® LSR 8800 permet d'obtenir des bétons de très haute qualité

- ☞ POLYFLOW® LSR 8800 permet la fabrication de bétons plastiques à auto plaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- ☞ Dans les bétons auto plaçants, POLYFLOW® LSR 8800 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- ☞ POLYFLOW® LSR 8800 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

Caractères généraux

POLYFLOW® LSR 8800 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- ☞ Longue rhéologie (>3h),
- ☞ Robustesse à la ségrégation,
- ☞ Qualité de parement.

Caractéristiques

Aspect

Liquide brun clair

Condit

- ☞ Fûts de 220 kg
- ☞ Conteneur perdu de 1100 kg
- ☞ Vrac

Construction





Construction

Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. POLYFLOW® LSR 8800 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact
Données techniques	
densité	1,07 ± 0,02
pH	5 à 5.5
Teneur en ions Cl-	≤ 0,1%
Teneur en Na ₂ O éq.	≤ 1%
Extrait sec	29% à 2%
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	POLYFLOW® LSR 8800 est ajouté, soit en même Temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Mentions légales	les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils et ne constituent pas une garantie de performance .L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Toutes nos fiches techniques sont mises à jour régulièrement, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

SOLU EST ®
Zone Industrielle Sidi Salem
ANNABA 23000-ALGERIE
Tél/Fax : +213(0)38 88 38 01
Tél : 0560 91 53 30 /31 -32
E.mail : solu-est@hotmail.fr
www.soluest-DZ.com