

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT
FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
Département de génie civil



Mémoire master
Option : Matériaux de Génie Civil

Préparé par :
KRIRICH Fatima Zahra

Thème :
Etat de l'art sur les bétons autoplaçants
léger« BAPL »

Les jurys :

M. Lakhdar AZZOUZ	Pr U.A.T. Laghouat	Président
M. Hamza SOUALHI	MCA U.A.T. Laghouat	Examineur
M. Idriss GOUAL	Pr U.A.T. Laghouat	Encadreur

إلى مولاي و خالقي ولي نعمتي و موفقني في مشواري الدراسي إلى من أنار دربنا رسولنا الكريم عليه
أفضل الصلاة و التسليم
إلى من أدين له بحياتي ، إلى من ساندني وكان شمعة تحترق لتضيء طريقي، إلى من أكن له مشاعر
التقدير و الاحترام و العرفان أبي الغالي حفظه الله
إلى أعلى ما املك في هذه الحياة، إلى من وضعت الجنة تحت أقدامها، إلى التي انحني لها بكل إجلال و
تقدير وأرجو أن أكون نلت رضاها أمي الغالية حفظها الله
إلى الوالدين الكريمين: الطيب و إبراهيم رحمه الله و الحزن الدافئ أمي أم الهناء و فاطمة
إلى من أرى التفاؤل بعينهما و السعادة بضحكتهما، إلى من كانا سندي بالحياة أخوأي: إبراهيم
إلى من كانت لي الام الثانية و العقل الراشد والمدبر ، إلى قدوتي في هذه الحياة أختي هاجر
إلى توأم روحي ورفيقة دربي ، إلى صاحبة القلب الطيب إلى من معها سرت الدرب خطوة بخطوة وما
تزال ترافقني حتى الان أختي هناء
إلى من كانت لي الدنيا بأكملها وقت حاجتي أختي نجاة و صليحة
إلى من شاركتني ذكريات طفولتي أختي الزهرة
إلى البراءة التي أنارت لي هذه الحياة و جعلت كل ما فيها بريق أمل و سعادة : ريتاج و أم الهناء...
إلى صديقة الطفولة ، إلى التي كانت بجانبني دائما ، إلى المحبة الصادقة و الوفية: هدى
إلى من قاسمت معهن ذكرياتي وكن لي رفيقات دربي طيلة مشواري الجامعي : حليلة، زهرة، انفال ، ام
الخير

إلى كل من ترك اثر جميل و بصمة لامعة في حياتي

إلى كل من وسعهم قلبي ولم تسعهم صفحتي

فاطمة الزهراء

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux , qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que je tiens à remercier est mon promoteur Pr. GOUAL Idriss pour l'orientation , la confiance , la patience qui ont constitué un rapport considérable sans lui ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Je remercie également tous les membres du jury. Monsieur le Professeur AZZOUZ Lakhdar et Monsieur le Docteur SOUALHI Hamza, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail .

Je présente mes meilleurs remerciement aux enseignants du département de génie civil de Université Amar Telidji de Laghouat pour tous leurs aident durant mon cursus universitaire.

Egalement je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de pret ou de loin à l'aboutissement de ce travail

Table de matières

إهداء.....	I
Remerciements	2
Table de matières	3
Listes des figures	6
Listes des tableaux :	8
Introduction générale.....	I
Introduction	1
1-Définition de BAP.....	1
2- Histoire du béton autoplaçant	1
3- Caractéristiques du BAP	2
3-1- Caractéristiques du BAP à l'état frais.....	2
3-1-3-1-Essai d'étalement (<i>Slump-flow</i>)	3
3-1-3-2-Essai de la boîte en «L»	3
3-1-3-3-Essai de stabilité au tamis	4
3-2- Propriétés des bétons autoplaçants a l'état durci	5
3-2-1-Propriétés mécaniques des BAP.....	5
4- les Avantages du BAP	6
5- Méthodes de formulation des BAP	7
5-1-La méthode Japonaise.....	8
Figure I.6: Composition du BAP selon l'approche japonaise	8
5-2-Méthode suédoise	9
6- Définition du béton léger	9
7- Propriétés des bétons légers	11
7-1- La masse volumique	11

7-2- La durabilité.....	11
7-3- La rhéologie à l'état frais	11
7-4- Les propriétés mécaniques.....	11
8-Les avantages de béton léger	12
9-L' inconvénient	12
10-Granulats légers pour bétons de structure	12
11-Procédés de fabrication des granulats légers	13
11-1- Granulats légers naturels	13
11-2- Granulats légers artificiels	13
12-Nature chimique des granulats légers	15
Conclusion :.....	17
Introduction	18
1-Méthode de formulation des BAPLSN basée sur le niveau de serrage du mélange et sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers.....	18
2-1-Principe de la méthode de composition	18
2-2-Schéma de synthèse de la méthode.....	20
3-Méthodes de composition des BAPL.....	21
4-Propriétés à l'état frais des BAPL.....	22
4-1- Etalement	22
4-2-Viscosité apparente	24
4-3-Résistance à la ségrégation des BAPL	25
4-3-1-Essai à la colonne	26
4-3-2-Essai au tamis	26
5-Propriétés mécaniques des BAPL	27
6-Propriétés de Durabilité des BAPL.....	28
Conclusion.....	31
Introduction	33

1-Campagne de caractérisation des bétons.....	33
1-1-Malaxage et conservation des éprouvettes en béton.....	35
2-Propriétés physiques à l'état frais	36
2-1-Masse volumique réelle et teneur en air occlus	36
2-2-Indice de ségrégation statique.....	40
3-Les propriétés d'écoulement	42
3-1-Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	43
3-2-Essai d'écoulement à l'entonnoir en V	44
3-3-L'essai à la boîte en L.....	44
4-Propriétés mécaniques	46
4-1-Résistance à la compression	46
4-2-Traction par fendage	46
4-3-Module d'élasticité	47
5-Propriétés de durabilité	48
5-1-Absorption et porosité accessible à l'eau	48
5-2-Carbonatation.....	50
Conclusion.....	51
Conclusion générale	52
References bibliographiques	54

Listes des figures

Figure I.1. Contexte de développement du béton autoplaçant au Japon.....	2
Figure I.2 : Essai d'étalement au cône (slump-flow).....	3
Figure I.3 : Essai de la boîte en L(L-boxtest).....	4
Figure I.4 : .Essai de stabilité au tamis.....	5
Figure I.5 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV. (REF) correspondant.....	6
Figure I.6 : Composition du BAP selon l'approche japonaise.....	8
Figure I.7 : Dimensions du mini cône.....	9
Figure I.8 : Représentation schématique des différents types de bétons légers Propriétés des bétons légers.....	10
Figure I.9 : Granulats légers naturels	13
Figure I.10 : Processus de fabrication de granulats légers à partir de boue issue de réservoir de .décantation	14
Figure I. 11 : Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique	15
Figure II.1 :Etalements de BAPL identifiés dans la littérature.....	23
Figure II.2: temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAPL identifiés dans la littérature...	24
Figure II.3 : Représentation schématique de l'effet du type de superplastifiant sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique	25
Figure II.4 : Essai de ségrégation	26
FigureII.5 : Résistance moyenne à la compression de BAPL identifiés dans la littérature.....	28
Figure II.6 : Expansion de prismes de mortiers avec un rapport eau/ciment égal à 0,55 après immersion dans une solution à 5 % de Na ₂ SO ₄ pendant 300 jours	30
Figure II.7 : Corrélation entre profondeur de carbonatation et perméabilité à l'eau de deux bétons pour différentes conditions de cure et exposés pendant 2 ans à une atmosphère marine.	31
Figure III.1 : Procédure d'introduction des constituants au cours du malaxage.....	35
Figure III.2 : Appareils de mesure de masse volumique réelle et de teneur en air.....	37
Figure III.3 :Comparaison de masse volumique et teneur en air entre l'aéromètre et le roll-a- meter.....	40
Figure III.4 : Physique de la ségrégation dans les bétons légers.....	41
Figure III.5 : Essai de ségrégation à la colonne.....	42
Figure III.6 Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	43
Figure III.7 : Appareillage de mesure de la capacité de remplissage.....	44

Figure III.8 :Appareillage de mesure de l'aptitude à l'écoulement.....	45
Figure III.9: moule transparent.....	45
Figure III.10 :Dispositifs d'essais de résistance et de rigidité.....	47
Figure III.11 : Absorption et porosité accessible à l'eau.....	49
Figure III.12 : Dispositif d'essai de carbonatation accélérée.....	50

Listes des tableaux :

Tableau I.1 : Compositions chimiques de quelques granulats légers.....	16
Tableau III.1 : Essais réalisés sur les formules de béton.....	33
Tableau III.2 : Masse volumique réelle et teneur en air occlus mesurées à l'aéromètre et au « roll-a-meter ».....	38
Tableau III.3: Composition en kg/m ³ de mortiers pour la validation de mesure de la teneur en air occlus.....	39
Tableau III.4 : Classes d'étalement.....	34
Tableau III.5 : Classes de viscosité apparente.....	44
Tableau III.6: Classes d'aptitude à l'écoulement.....	46

Introduction générale

Les bétons auto-plaçants (BAP) sont des bétons, très maniables, homogènes et stables qui se mettent en place sous le seul effet de la gravité. Leur serrage ne nécessite pas de vibration interne ou externe même en présence d'un réseau d'armatures dense. Grâce à ces nombreux avantages, les bétons auto-plaçants (BAP) sont aujourd'hui considérés comme étant l'une des innovations les plus marquantes des deux dernières décennies dans le domaine du béton. L'idée de ce matériau innovant a été lancée dans les années 1980 par des chercheurs de l'Université de Tokyo. Il a très vite concis les industriels du Japon et du monde au point de connaître un essor véritable ces dernières années dans l'industrie du béton en France. Les BAP présentent plusieurs avantages. L'intérêt technique se justifie par le remplissage des coffrages très ferrailés sans moyen de serrage, la fabrication de pièces de formes complexes et la qualité du matériau et du parement. L'intérêt économique trouve son essence dans le gain de temps et de main d'œuvre à la mise en place, l'augmentation de la durée de vie des moules. L'intérêt social et environnemental se juge par l'absence de bruit, la réduction de la pénibilité et l'amélioration de la sécurité au travail.

Sur le plan rhéologique, les bétons auto-plaçants sont caractérisés par un seuil de cisaillement inférieur à 100 Pa et une viscosité comprise entre 20 et 100 Pa.s et parfois plus

Les bétons légers, c'est à dire ceux dont la masse volumique à l'état sec est inférieure à 1800 kg/m³, sont employés dans le génie civil depuis le début du 20^{ème} siècle, dans les pays développés d'Europe (France, Allemagne), d'Amérique (USA) et d'Asie (Japon et exURSS). Depuis lors, les applications ne cessent de se multiplier à cause des avantages que présente ce produit tant sur le plan économique que technique.

L'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine qui se situe entre 27 avant J. C. et 476 après J. C. Plusieurs édifices pour ne citer que le Panthéon et le Colisée de Rome sont réalisés en partie en béton léger [1]. Par exemple, le dôme du panthéon d'une portée d'environ 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables dont un contenant de lapierre ponce. Après le déclin de l'empire Romain, l'utilisation des granulats légers naturels tels que la pierre ponce, la pouzzolane, la diatomite etc. a été ralentie jusqu'à l'avènement des granulats légers artificiels tels que l'argile expansée, l'ardoise expansée, cendre volante frittée etc.

L'introduction des granulats légers dans le béton peut conférer au matériau, une association de qualités telles que la légèreté et l'isolation thermique. Le remplacement des granulats de

masse volumique normale par des granulats légers allège le poids propre des produits en béton qui parfois peut constituer un handicap pour le transport. L'allègement de poids propre du béton influe positivement sur le dimensionnement de l'infrastructure et la superstructure d'un édifice. La masse volumique réelle sèche des bétons légers varie entre 400 et 2 000 kg/m³ contre environ 2 300 kg/m³ pour un béton traditionnel soit une réduction de poids autour de 15 à 80 % par rapport au béton traditionnel. Selon la masse volumique réelle sèche, on peut distinguer deux familles de bétons légers : les bétons légers isolants et les bétons légers de structure. Les bétons légers isolants dont la masse volumique réelle sèche se situe entre 400 et 1 200 kg/m³ sont préconisés lorsque les propriétés thermiques sont prépondérantes. Les bétons légers de structure dont la masse volumique varie de 1 200 à 2 000 kg/m³ sont utilisés lorsque les performances mécaniques deviennent prééminentes.

L'association de ces deux familles ouvre donc la voie à un nouveau béton qui aurait l'avantage d'être à la fois auto-plaçant et léger le béton auto-plaçant léger (BAPL). Il peut combiner les propriétés mécaniques et thermiques du béton léger de structure et les propriétés rhéologiques intrinsèques du béton auto-plaçant

Le deuxième chapitre présente la méthode de formulation et le principe de la méthode de composition , les propriétés mécanique et durabilité des BAPL.

Le troisième chapitre traite campagne de caractérisation des bétons ,Malaxage et conservation des éprouvettes en béton, propriétés physiques à l'état frais, les propriétés d'écoulement, Propriétés mécaniques et propriétés de durabilité



ossature poteaux- poutre en BAP



Voussoirs en BAP



navire en béton léger datant de 1943



*tnuel avec des voussoirs allégés à
Oslo en 2004*

Figure structures en béton auto-plaçant et en béton de granulats légers

Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons autoplaçants et les bétons léger. La première section traite la définition du BAP, son historique développement, les caractéristiques et les propriétés du BAP ,ses avantages et la méthode de formulation. La deuxième partie traite de chacun des définition du béton léger, les propriétés du béton léger , ses avantages , procédés de fabrication et la nature chimique des granulats léger.

1-Définition de BAP

Le béton autoplaçant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité, conformément aux exigences de durée de vie de certaines charges et conditions environnementales.

Le BAP est un béton fluide qui s'écoule librement à travers les ferraillements condensés, il remplit convenablement le coffrage, et se consolide sous son propre poids sans nécessité de moyens de vibration ou de compactage.

La mise en place, sous le seul effet de la gravité , nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de super plastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité .

Le BAP ayant une excellente capacité de remplissage et d'écoulement, et présente une bonne résistance à la ségrégation[2].

2- Histoire du béton autoplaçant

L'histoire du béton autoplaçant (BAP) remonte aux années 1980. La nécessité du BAP était déclarée la première fois par le prof HAJIME OKAMURA à l'université de technologie de Kochi au Japon en 1986 . Pendant cette période, il y avait un manque dans le nombre des ouvriers qualifiés au Japon qui a directement affecté la qualité du béton(Figure I.1). À ce problème, le BAP a été édifié pour répondre au besoin d'un béton durable de haute résistance qui possède une bonne fluidité et qui est capable de remplir les coffrages de forme complexe et fortement ferrailés sans aucune nécessité de moyens de vibration ou de compactag

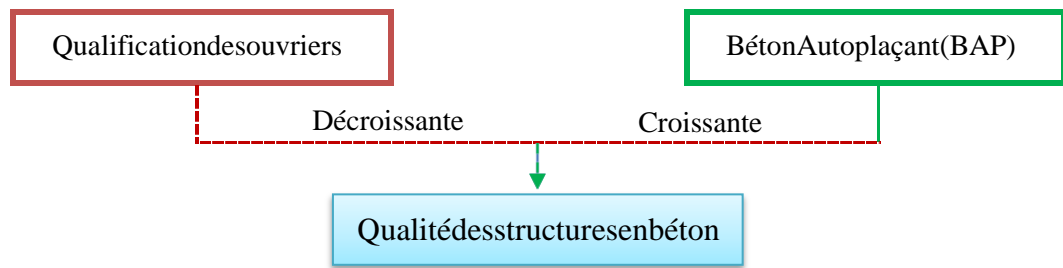


Figure I.1 : Contexte de développement du béton autoplaçant au Japon

3- Caractéristiques du BAP

3-1- Caractéristiques du BAP à l'état frais

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures et coffrages).

Ils doivent donc offrir une bonne résistance à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage), mais aussi à la ségrégation « statique » (une fois en place), afin de garantir l'homogénéité de leurs caractéristiques, de ne pas présenter de ressuage ou de tassement et de garantir un remplissage optimal des coffrages.[2]

Trois principaux paramètres permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP et leurs propriétés à l'état frais:

3-1-1- Fluidité et mobilité en milieu non confiné

Signifie la capacité du BAP à s'écouler et à remplir les coffrages infinis avec une viscosité suffisante. Ce paramètre est caractérisé par la mesure d'étalement au cône d'Abrams selon norme NF EN 12350-8.[2]

3-1-2- Déformabilité et mobilité en milieu confiné

Il s'agit de la capacité du BAP à s'écouler à travers des obstacles et à remplir les coffrages fortement armés sans ségrégation dynamique. La déformabilité est caractérisée par l'essai de la boîte en L selon la norme NF EN 12350- 10.

3-1-3- Stabilité du mélange et résistance à la ségrégation statique

C'est la capacité du BAP à rester homogène après sa mise en œuvre. Ce paramètre est identifié par l'essai de stabilité au tamis selon norme NFEN 12350-11.

3-1-3-1-Essai d'étalement (*Slump-flow*)

La fluidité et la mobilité du BAP en milieu non confiné sont caractérisées par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou *slump-flow*). Le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique (figure I.2). L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en 6 litres de béton, puis de le soulever et de mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue (mesures correspondant à 2 diamètres perpendiculaires). Plus le diamètre est grand, plus le matériau est fluide.[2]

La norme NFEN12350-8 classe le BAP en trois catégories selon l'étalement:

- $550 \leq SF \leq 650 \text{ mm}$: BAP convient aux structures en béton non renforcée ou légèrement renforcées.
- $660 \leq SF \leq 750 \text{ mm}$: BAP convient aux applications courantes (murs, colonnes).
- $760 \leq SF \leq 850 \text{ mm}$: BAP convient aux applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes.

Des valeurs de $SF > 850 \text{ mm}$ peuvent être spécifiées dans quelques cas spéciaux mais le grand soin devrait être pris concernant la ségrégation et la taille maximum.

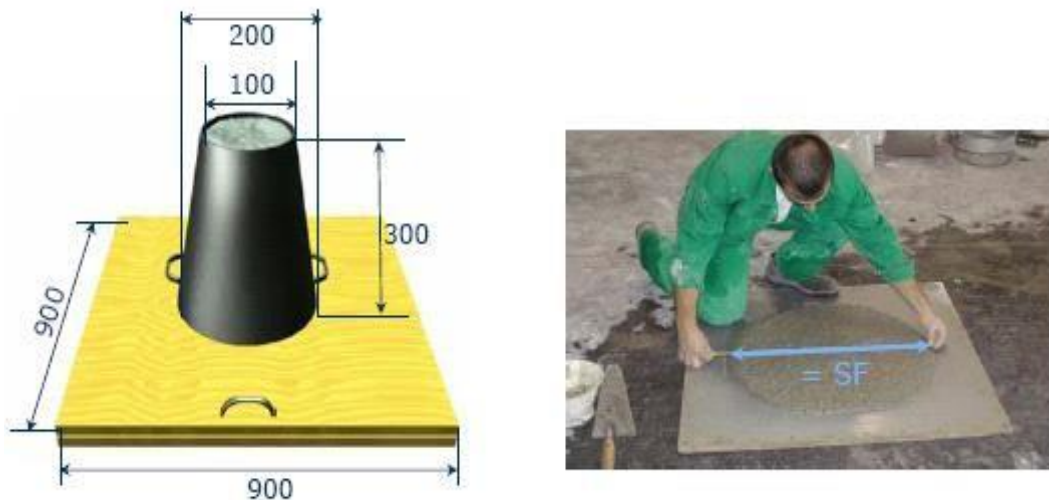


Figure I.2 :Essai d'étalement au cône d'ABRAMS (slump-flow)

3-1-3-2-Essai de la boîte en «L»

L'essai de la boîte en «L» permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Le principe de cet essai est le suivant ; La partie verticale de la boîte est entièrement Remplie de béton(le volume nécessaire est d'environ 13l). Après une minute, la trappe est le vé

permettant l'écoulement du béton dans la partie horizontale de la boîte à travers trois armatures de diamètre 14 mm et distant entre eux de 39 mm. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs finales de béton aux extrémités (H_1 à l'extrémité de la partie verticale et H_2 à celle de la partie horizontale) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 qui renseigne sur la mobilité de BAP en milieu confiné. Ce taux doit être supérieur à 0,80 pour obtenir un BAP . La figure I.3 montre en détail le schéma de la boîte en «L» avec ses dimensions .[2].

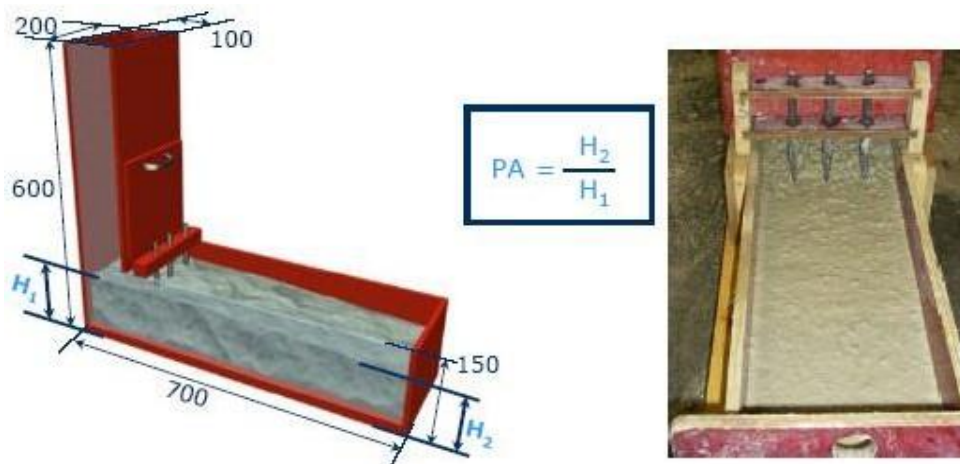


Figure I.3 : Essai de la boîte en L(L-boxtest)

3-1-3-3-Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de la boîte en L. On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance(figure I.4) .[3].

On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- $0\% < \% \text{ Laitance} < 15\% \Rightarrow$ Stabilité satisfaisante.
- $15\% < \% \text{ Laitance} < 30\% \Rightarrow$ Stabilité critique.
- $\% \text{ Laitance} 30\% \Rightarrow$ Stabilité très mauvaise.

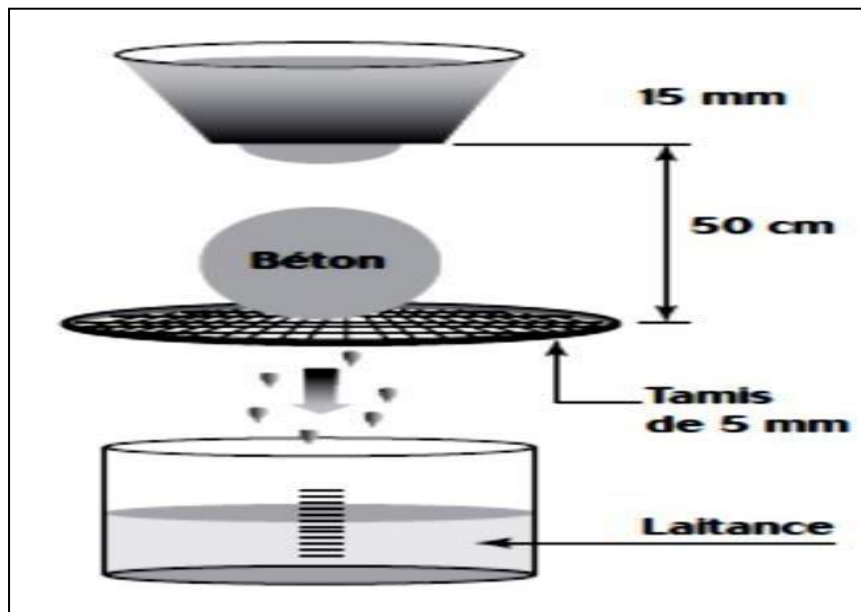


Figure I.4 : .Essai de stabilité au tamis

3-2- Propriétés des bétons autoplaçants a l'état durci

Les propriétés du béton à l'état durci comportent trois aspects : propriétés mécaniques (résistances, module d'élasticité), déformations sans charges (retrait, fluage...) et durabilité (porosité, perméabilité, cycle gel-dégel...). Il est intéressant de présenter les tendances d'évolution des propriétés des BAP par rapport à celles des bétons vibrés, BV, correspondants.[3].

3-2-1-Propriétés mécaniques des BAP

De nombreuses études ont été menées sur les propriétés mécaniques des BAP contenant des fillers calcaires comparées aux bétons traditionnels vibrés . Les résultats qui s'en dégagent montrent que la résistance à la compression de BAP à long terme est supérieure ou au moins égale à celle du BV correspondant (formulé à des rapports E/C constants ou E/L identiques

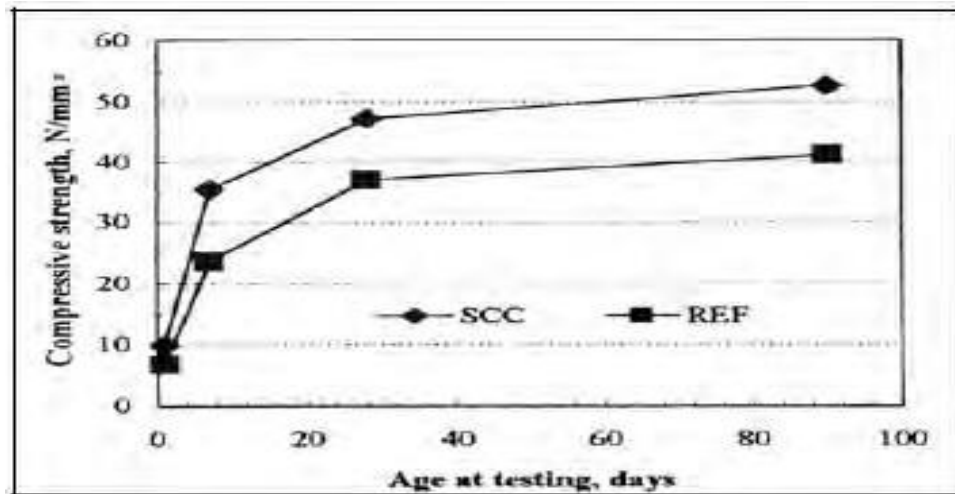


Figure I.5 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV.(REF)correspondant [4]

Certains auteurs ont observé une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours (Figure I.5). Cette accélération s'explique par l'hydratation favorisée par les petites particules du filler et ceci d'autant plus remarquable que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est importante.

Les résultats de ElHilali n'échappent pas à ce constat : au jeune âge, la résistance à la compression est d'autant plus importante (21MPa à 24h) que la surface de Blaine des additions calcaires est élevée. Elle s'est stabilisée à 60 MPa entre 21 et 28 jours atteint puis entre 70 et 80 MPa à 8 mois une résistance.[4].

4- les Avantages du BAP

Le béton autoplaçant offre beaucoup d'avantages par rapport de B.V on oeut citer les plus importante :

- Écoulement facile à travers et autour de l'acier d'armature sous son poids propre et sans besoin d'équipement de vibration ou de compactage.
- Réduction les nuisances sonores grâce à l'absence de vibration.
- Favorise le bétonnage en grande masse dans les sections à géométrie complexe fortement ferrillée.
- Permet d'économiser le coût de coffrage grâce à son utilisation plus longtemps en raison de l'absence des équipements de vibration.

- Amélioration la résistance grâce à l'augmentation de la compacité et la diminution de la porosité.
- Assure une bonne étanchéité à l'eau et offre ainsi des propriétés de transport réduites et une durabilité adéquate.
- Offre une résistance initiale élevée et permet ainsi une réutilisation plus rapide du moule de coffrage, ce qui diminue la durée de construction et améliore la productivité.
- Convient parfaitement aux moules minces à géométrie complexe.
- Mise en place rapide du béton ce qui augmente la capacité de construction.
- Nécessite moins de main-d'œuvre pour le transport et la mise en place du béton, améliorant ainsi l'environnement de travail et la sécurité.
- Améliore l'aspect esthétique du béton et fournit la bonne finition sans aucun pore extérieur.

5- Méthodes de formulation des BAP

Le béton autoplaçant a été développé pour la première fois dans la fin des années 1980 au Japon. Les précurseurs OKAMURA et OUCHI ont mis au point un béton fluide qui se met en place dans les milieux confinés, sans ségrégation, sous l'effet de son propre poids. Partant de leurs travaux, différentes techniques se sont développées pour l'optimisation des constituants de BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde. Quelle que soit la méthode adoptée, les grandes lignes d'optimisation restent pratiquement communes. L'analyse de DOMONE des études effectuées à travers le monde révèle que la composition des BAP est basée sur :

- Un volume de gravillons variant entre 28% et 38% du volume total du BAP.
- Un volume de pâte variant entre 30 à 42% du volume total du BAP.
- Un rapport $\frac{E}{L} < 0.48$ en masse du matériau.
- Un dosage en liant (ciment+additions) variant de 385 à 635 Kg/m³.
- Le dosage en super plastifiant proche de son dosage à saturation.

Les méthodes d'optimisation les plus répandues sont énumérées ci-dessous:

5-1-La méthode Japonaise

Elle consiste à privilégier le volume de pâte au détriment de celui des granulats (Figure I.6). Elle est basée sur les concepts suivants:

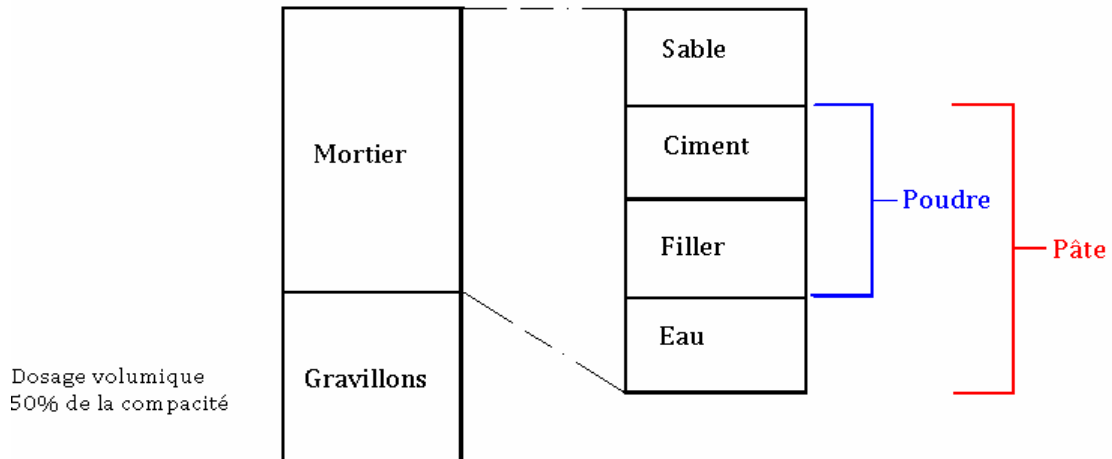


Figure I.6: Composition du BAP selon l'approche japonaise

- Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains+vides) afin de minimiser le risque de blocage.
- quantité de sable limitée à 40% du volume du mortier.

Rapport eau/poudre et dosage en superplastifiant sont optimisés à l'aide d'essais d'étalement au mini-cône (Figure I.7) et au V-Funnel. Ces deux essais permettent de calculer respectivement l'étalement relatif et la vitesse d'écoulement $V_m = \frac{10}{t}$ où D_{est} l'étalement de la galette de mortier, D_0 est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs ont montré que pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$, et $V_m = 1$. [4].

$$\Gamma_m = \frac{D^2 - D_0^2}{D_0^2} \quad I - 1$$

Cette approche de formulation conduit à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux car fortement dosés en ciment et en super plastifiant et, peu viables économiquement.

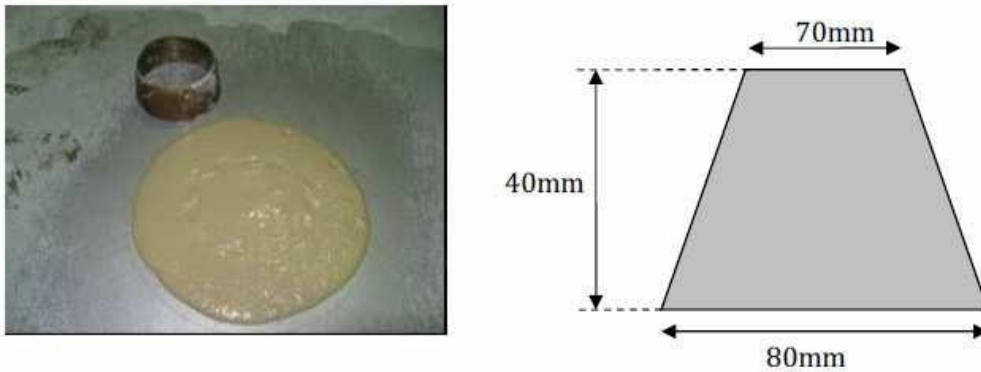


Figure I.7: Dimensions du mini cône.

5-2-Méthode suédoise

La méthode est basée sur l'étude effectuée par TANGTERMSIRIKUL et al. . En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. À l'aide de l'Équation I-2, ils estiment le volume de la pâte critique pour le blocage pour un confinement donné et pour chaque rapport granulats/sable (G/S.)

$$R_b = (1 - V_b) \sum \frac{y_i}{V_{critique}} \quad I - 2$$

y_i : Proportion volumique de grains de taille d_i rapportée au volume de granulat

V_p : Proportion volume de la pâte dans le béton

$v_{critique, di}$: Fraction en volume de grain de taille « d_i » induisant un blocage.

Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchée sen ouvrabilité, stabilité et résistance à la compression.

Les fines, l'eau et le super plastifiant sont ajustée par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat [2].

6- Définition du béton léger

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique.

En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³ , tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m³

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction.

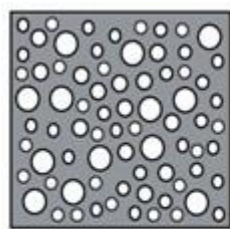
En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction [5].

Pour développer un béton léger, ont doit prendre en considération deux aspects :

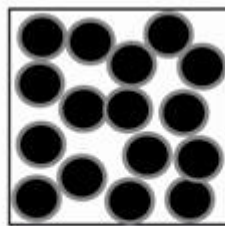
- les particularités en matière de formulation des bétons légers,.
- la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient(Figure I.8) :

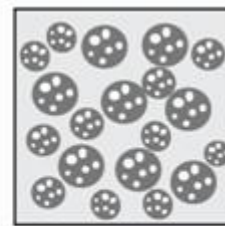
- 1- les bétons cellulaires .
- 2- les bétons sans fines (caverneux) .
- 3- les bétons de granulats légers (argile expansé) [5].



Béton Cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure I.8 : Représentation schématique des différents types de bétons légers Propriétés des bétons légers.

7- Propriétés des bétons légers

La description des propriétés des bétons sera davantage axée sur les éléments suivants :

- la faible masse volumique.
- la durabilité..
- la rhéologie à l'état frais
- les propriétés mécaniques (résistance a la compression, module d'élasticité, etc.).

7-1- La masse volumique

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants [5].

7-2- La durabilité

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont différents [5].

7-3- La rhéologie à l'état frais

La rhéologie du béton à l'état Frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité.

On qualifie la rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages [5].

7-4- Les propriétés mécaniques

Parmi les propriétés mécaniques, on retrouve la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. Ces propriétés sont des paramètres secondaires dans la conception d'un béton ultra- léger puisque leur importance est relativement mineure pour ce type de béton.

Toutefois, on ne peut les négliger puisque tous les bétons, peu importe l'application, nécessitent un minimum de résistance mécanique [5].

8-Les avantages de béton léger

- plus léger qu'un béton classique.
- Bonne isolation phonique et thermique
- Mise en place facile et rapide
- Fort maniabilité
- Non inflammable

9-L' inconvénient

- Résistances moins élevée que pour eu béton ordinaire(voir résistance à la compression)

10-Granulats légers pour bétons de structure

Les granulats légers sont des matériaux poreux. Avant de présenter ces matériaux, nous allons définir deux grandeurs qui caractérisent leur légèreté : la masse volumique en vrac et la masse volumique réelle. La masse volumique en vrac désigne le rapport de la masse de granulat léger sec pour remplir de façon aléatoire un récipient sur le volume du récipient. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulat léger sec sur le volume qu'elle occupe dans l'eau [6].

Selon la norme NF EN 206-1/CN, les granulats utilisés dans le domaine de la construction peuvent être subdivisés en trois catégories :

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

Il existe deux familles de granulats légers

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

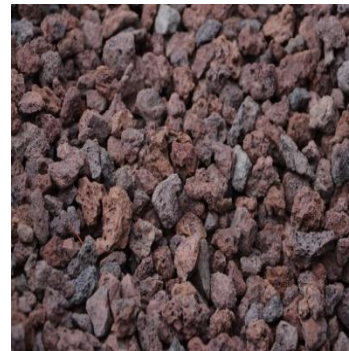
11-Procédés de fabrication des granulats légers

11-1- 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(Figure I.9).



Diatomite



pouzzolane

Figure I.9 : Granulats légers naturels

11-2- Granulats légers artificiels

Les granulats légers artificiels sont des granulats d'origine minérale dont l'expansion nécessite un traitement thermique préalable pour donner la structure alvéolée qui caractérise les granulats légers. En général, les méthodes d'expansion utilisées pour la fabrication des granulats sont à haute température (entre 1 100 et 1 500 °C). Il existe différents procédés qui

dépendent de la matière première utilisée, du mode de préparation et du système de cuisson. 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 (www.idco-france.com/). 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. La (Figure I.10) illustre les différentes phases du processus de fabrication d'un granulats léger à partir de boue issue d'un bassin de décantation [6].



Figure I.10 : Processus de fabrication de granulats léger à partir de boue issue de réservoir de décantation

12-Nature chimique des granulats légers

D'après les travaux de (Riley 1950), la composition chimique des argiles expansibles appartient au domaine délimité sur le diagramme ternaire à la Figure I.11

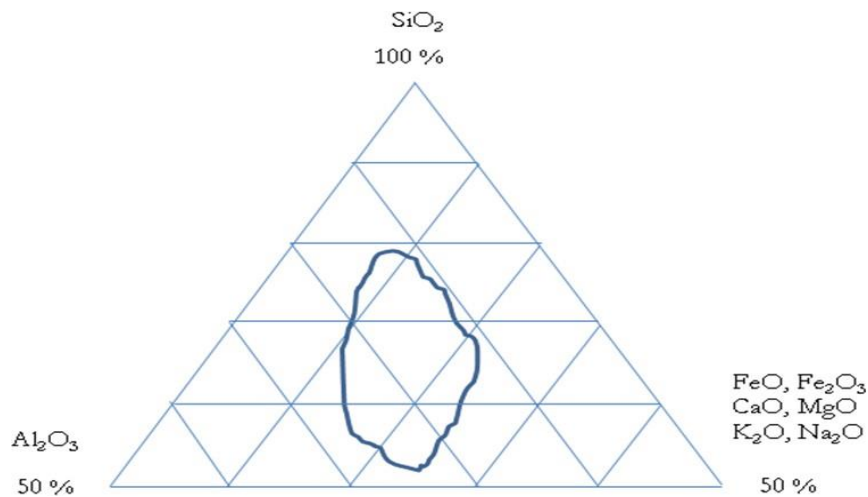


Figure I. 11 : Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Latifou .2014)

La composition chimique des granulats légers dépend de la matière première utilisée. En général, ils sont constitués de silice, d'alumine, de chaux, d'oxydes métalliques et d'alcalins .Le Tableau I.1 présente la composition minérale de quelques granulats léger susuels.

Tableau I.1 : Compositions chimiques de quelques granulats légers

EuroPomice	Liaver	Granule x-GEM	Liapor	Argex	Producteurs	Proportions de Composés chimiques (%)																	
						Pierre Ponce	Verre expansé	Ardoise expansée	Argile Expansée	Argile Expansée	Type de granulats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn2O3	SO ₃	FeO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
62,5	72,5	63	55	55-65																			
17,5	1,5	21	24	15-19																			
2,6	0,3	8,5	14	12-16																			
2,5	8,8	0,5	5	1-3																			
0,4	2,1	1	-	1-2																			
-	-	-	-	0,15-0,25																			
-	0,1	-	-	-																			
-	-	-	-	-																			
-	0,044	-	-	-																			
9,5	0,7	3,6	2	1,5-3,5																			
2,2	13,7	1,5	2	0,3-0,7																			
0,5	0,06	-	-	0,8-1																			
-	-	-	-	0,7-1,3																			

Conclusion :

Le béton autoplacant BAP, est un béton spécial qui fournit des performances optimales des propriétés d'écoulement, de résistance et de durabilité

L'utilisation des Bétons autoplacants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques à l'état durci.

les bétons légers ont été employé dans notre pays d'une façon timide et individuel, mais ils connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt, qui semble tout a fait mérité en raison de leurs propriétés techniques et économiques intéressantes.

Introduction

Ce chapitre traite schéma de synthèse de la méthode de formulation de BAPL , principe de la méthode de composition et les propriétés mécanique et durabilité des BAPL.

1-Méthode de formulation des BAPLSN basée sur le niveau de serrage du mélange et sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers

Une méthode de formulation est proposée après l'optimisation de l'absorption du granulat léger, la définition d'un critère de contrôle de la ségrégation et la validation du mode le série/parallèle. Cette méthode vise la formation de bétons auto-plaçants légers de structure. Elle est basée sur le contrôle du niveau de serrage du béton frais pour une auto-plaçance adaptée et sur l'optimisation de la demande en eau des granulats légers à partir du protocole d'absorption dans la pâte [6].

2-1-Principe de la méthode de composition

La méthode de composition est itérative et se déroule en deux phases. La première phase 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 auto-plaçant 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 p_f qui permet de limiter le dosage en ciment et de contrôler les propriétés mécaniques et élastiques du mortier des able normal . Elle est prise entre 0,2 et 0,3.

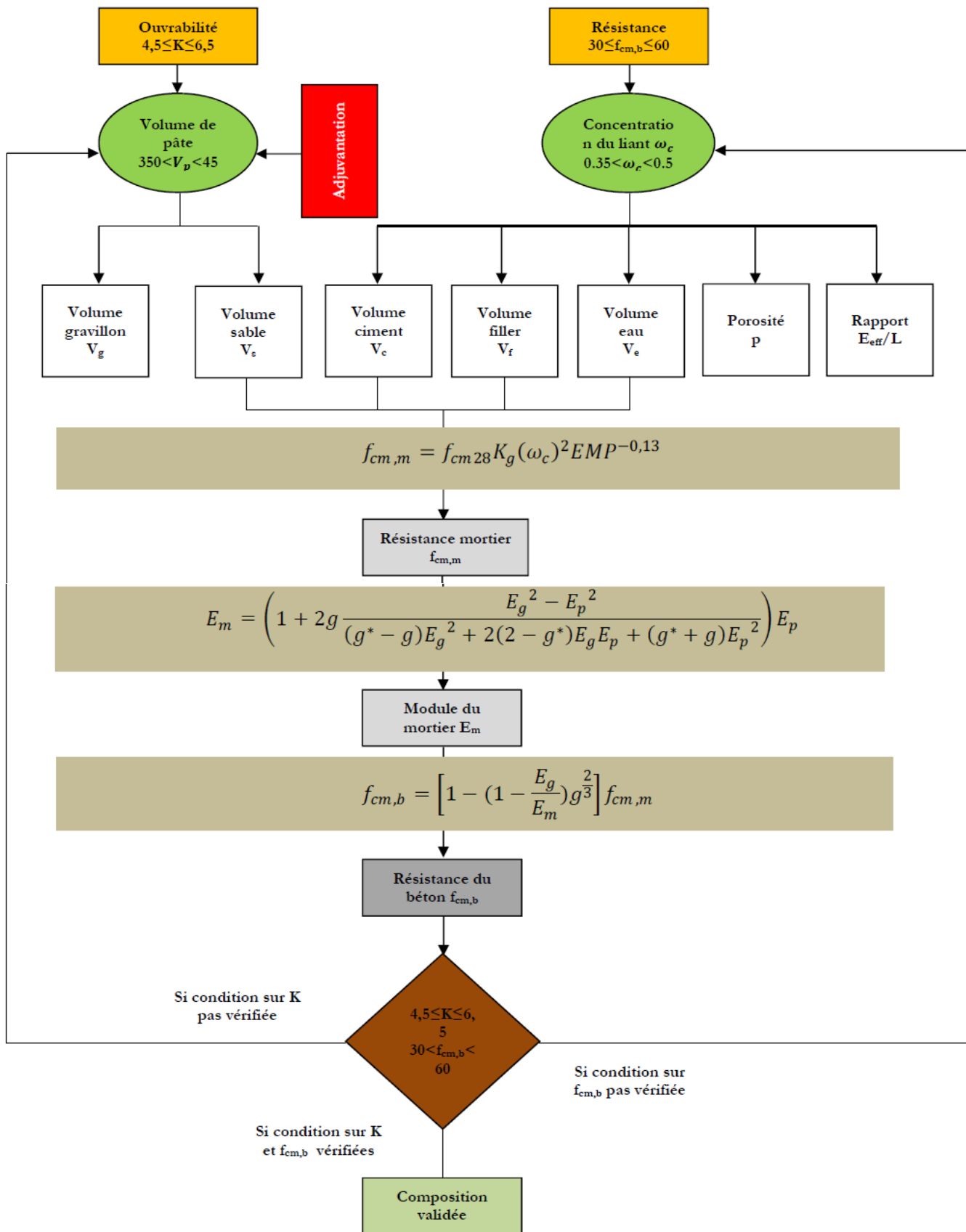
✚ le volume d'air occlus pris arbitrairement égal à 2 % du volume de béton.

La seconde phase repose sur la vérification de l'aptitude à la ségrégation du mélange. Les données de composition à l'issue de la première phase permettent de calculer l'indice de serrage K du béton. Un indice de serrage compris entre 4,5 et 5,5 permet d'assurer à la fois l'auto-plaçance et la stabilité au béton.

La quantité d'eau d'ajout et la masse des constituants granulaires secs sont corrigées avec la prise en compte de la teneur en eau initiale des granulats. Pour tenir compte de la demande en eau des granulats légers, la quantité d'eau efficace est ajustée à partir de l'absorption à 1 heure dans une pâte de rapport E/C de 0,5 [6].

La quantité de super plastifiant est ajustée au cours du malaxage pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée. Pour les différentes compositions de BAPL, le dosage en super plastifiant se situe entre 0,3 et 1,0 % d'extrait liquide rapporté à la masse de liant (ciment et addition) et reste largement en de ç à du dosage de saturation autour de 5% (extrait liquide)

2-2-Schéma de synthèse de la méthode



3-Méthodes de composition des BAPL

Les auteurs ont proposé des adaptations des méthodes de formulation courantes pour la composition des bétons autoplaçants (BAP) légers. Les contributions portent notamment sur la prise en compte de l'absorption et la légèreté des granulats légers [7]. La forte absorption d'eau des granulats légers peut dans certains cas modifier les paramètres de compositions tels que le rapport E_{eff}/L et la masse volumique réelle [6].

Au sens de la norme NF EN 206-1/CN, la teneur en eau efficace est la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats. Dans le cas des granulats traditionnels l'eau absorbable est marginale (entre 0,1 et 2 % en proportion massique). En revanche, l'eau absorbable par les granulats légers est plus importante et peut atteindre 15 % et plus en proportion massique selon [8] et [9]. Dans la pratique, l'absorption différée du granulat léger peut se traduire par une chute brutale de l'ouvrabilité du béton en présence de granulats légers secs ou pré-humidifiés [10].

La légèreté qui est l'un des principaux avantages des granulats légers est considérée comme une des principales difficultés dans la formulation des BAPL. En général, les bétons incorporant des granulats légers ont une forte propension à la ségrégation en raison du contraste de densité pâte/granulats [11]. Cette singularité augmente le risque de ségrégation durant le malaxage, le transport et la mise en place du béton léger frais. Elle est d'autant plus 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 survenir lors de la vibration, elle n'assure de facto, ni l'homogénéité ni la stabilité du mélange à l'état frais en particulier des BAPL selon [12] et [13]. 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 [8]. Une autre conséquence de la ségrégation des BAPL va être une variation spatiale des propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci.

On a adapté la proportion du granulat léger en adoptant un rapport volumique G/S de 1,2 et le rapport E_{eff}/L de 0,39 obtenus pour des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) homogènes et stables. Le choix de granulat léger résistant pour limiter la différence de rigidité entre la matrice cimentaire et les granulats légers a permis d'améliorer les performances mécaniques du béton.

On a adapté les propriétés de la pâte et du mortier de sable normal en incorporant un agent de viscosité pour formuler des BAPL de granulats d'argile expansée et d'ardoise expansée présentant des propriétés à l'état frais similaires au BAP traditionnel en termes d'étalement et

de viscosité apparente. abordent dans le même sens et montrent que l'optimisation du dosage en liant et des paramètres rhéologiques du mortier de sable (seuil de cisaillement et viscosité) permet de formuler des BAPL de masse volumique réelle à l'état frais comprise entre 1 500 et 2 000 kg/m³. Cette approche consiste à définir un mortier dont les propriétés rhéologiques sont suffisamment faibles pour faciliter l'écoulement du matériau mais suffisamment élevées pour limiter le risque de blocage des granulats légers [6].

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

- au pré-mouillage pour atténuer l'absorption dans la pâte .
- à l'utilisation d'agent de viscosité pour optimiser 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.

4-Propriétés à l'état frais des BAPL

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 et l'essai à la colonne permettent de caractériser la résistance à la ségrégation du béton [6].

4-1- Etalement

L'essai d'étalement permet de mesurer la mobilité du béton auto-plaçant en l'absence d'obstacles. L'étalement peut être déterminé selon la norme NF EN 12350-8. Différents

bétons auto-plaçants légers contenant des granulats légers d'origine minérale (rhyolite expansée, argile expansée, ardoise expansée, cendre volante frittée, perlite expansée) et des granulats de polystyrène sont recensés dans la littérature. Les étalements de 26 compositions de bétons auto-plaçants léger tirées de 13 articles sont présentés sur la Figure 1.17 [6].

- 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.

[14] 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 [15] 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

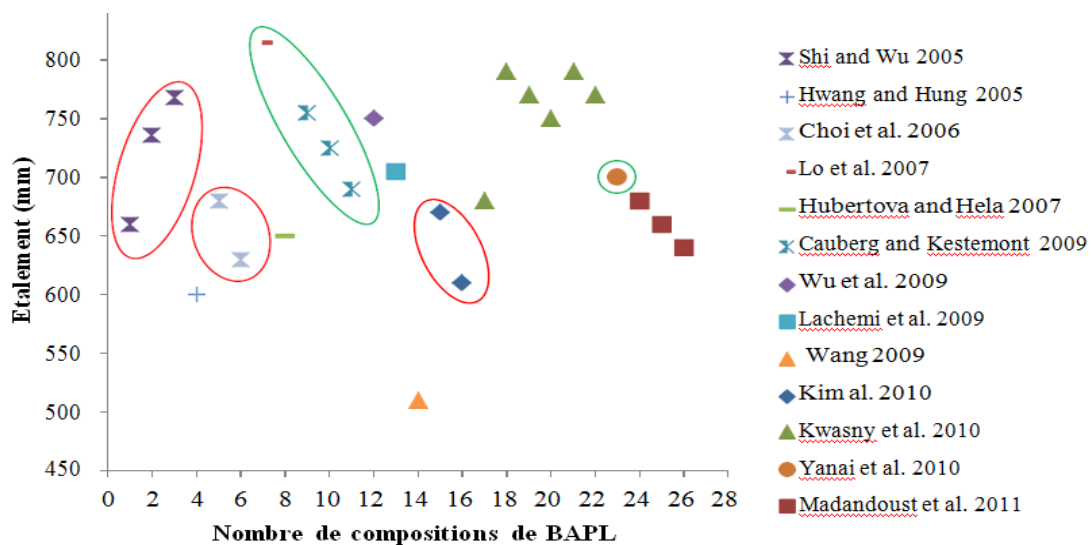


Figure II.1 :Etalements de BAPL identifiés dans la littérature[6]

L'adjuvantation des bétons autoplaçant légers 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 II.1, les compositions encerclées de vert contiennent un super plastifiant et un agent de viscosité tandis que les compositions encerclées en rouge contiennent un super plastifiant et un entraîneur d'air [6].

Pour valider l'aptitude à l'écoulement du béton auto-plaçant, 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-plaçants légers tirées de la littérature est supérieur à 0,80 comme pour les bétons auto-plaçant traditionnels.

4-2-Viscosité apparente

La capacité de remplissage du béton auto-plaçant 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 T500. La viscosité apparente est d'autant plus grande que le temps d'écoulement est grand.

L'examen de 25 formules de bétons auto-plaçants légers tirées de 10 articles et présentées à la Figure II.2 indique que le temps d'écoulement à l'entonnoir en V se situe entre 3 à 24 secondes pour ce type de matériau[6].

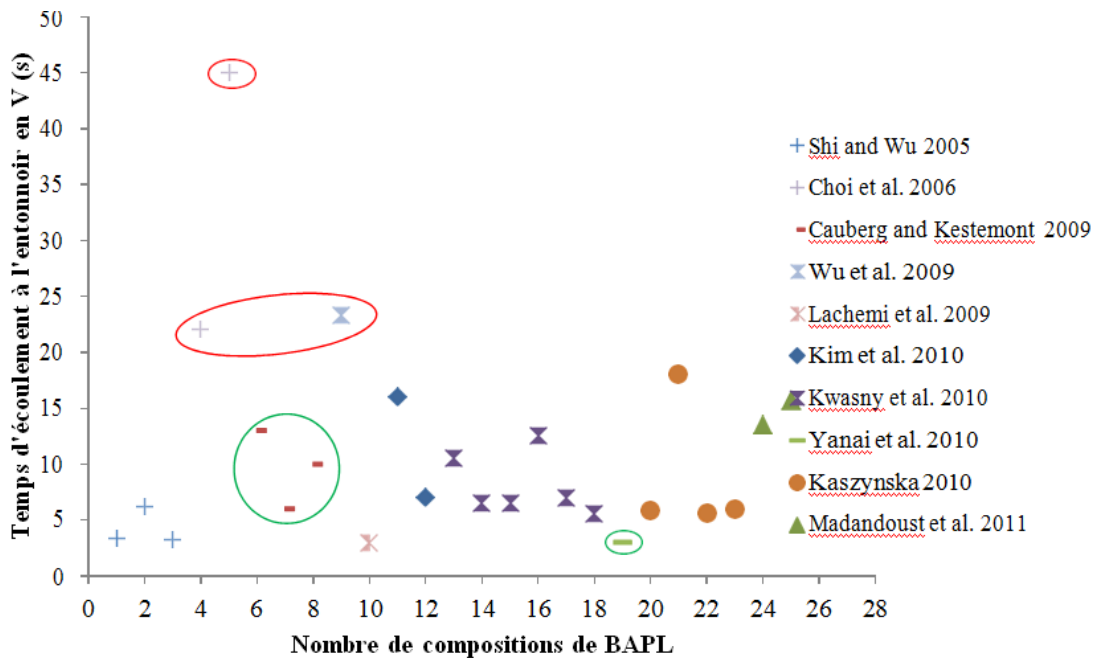
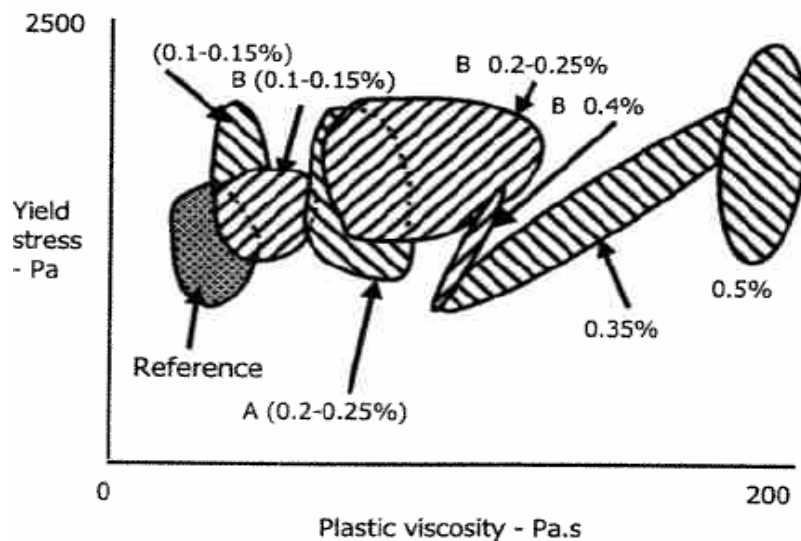


Figure II.2 : temps d'écoulement à l'entonnoir en V de BAPL identifiés dans la littérature[6]

Nous constatons que les compositions contenant un agent de viscosité et encerclées en vert ne sont pas les plus visqueux. Les compositions encerclées en rouge qui sont les plus visqueux, 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 [17] montrent que l'effet des super plastifiants (à base de poly-carboxylates) s'accompagne selon le dosage, d'une augmentation du seuil de cisaillement et la viscosité du béton comme l'indique la Figure II.3 [6].



Type A : Fonctions stérique et entropique (longue chaîne) **Type B** : Fonction stérique (courte chaîne)

Figure II.3 : Représentation schématique de l'effet du type de superplastifiant sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [17]

4-3-Résistance à la ségrégation des BAPL

La ségrégation est un paramètre très important pour la validation d'un béton auto-plaçant .

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.

L'état de l'art sur les propriétés des BAPL présenté par [10] 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[6].

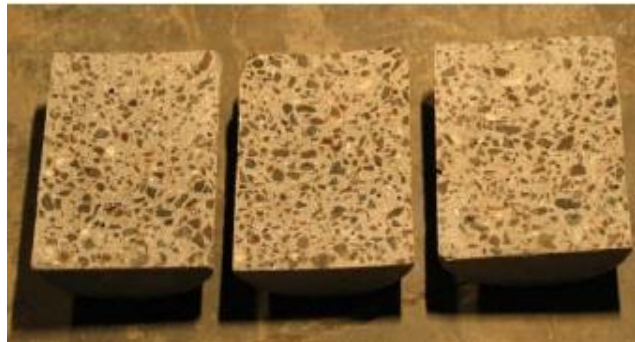
4-3-1-Essai à la colonne

Ont proposé un essai à la colonne proche du celui proposé auparavant par. La colonne est constituée d'un tube PVC de 20 cm de diamètre et de 66 cm de long prédécoupé en 4 sections identiques. L'essai consiste à déverser le béton dans la colonne et à la laisser reposer pendant 15 minutes. Chaque section est pesée et lavée sur un tamis pour retenir les gravillons pesés à l'état saturé sec en surface. Le coefficient de variation de la distribution le long de la colonne noté I_{seg} est déterminé. La résistance à la ségrégation est appropriée si I_{seg} est inférieur à 4 %. L'essai à la colonne réalisé sur un béton frais est complété par un essai de fendage à l'état durci [6].

Indiquent que l'essai à la colonne, sous réserve d'une exploitation correcte des résultats s'avère être un outil d'optimisation et de contrôle fiable. ont montré que la combinaison de l'essai à la colonne et de l'essai du fendage d'éprouvette cylindre (Figure II.4) donne un bon indicateur pour caractériser l'aptitude à la ségrégation des BAPL [6].



(a) Colonne de 20 cm de diamètre et 66 cm de long



(b) Fendage d'éprouvettes

Figure II.4 : Essai de ségrégation

4-3-2-Essai au tamis

L'essai de stabilité au tamis est régi par la norme NF EN 206-9 et permet d'évaluer la résistance à la ségrégation du béton auto-plaçant. Il consiste après prélèvement à déverser une masse donnée de béton frais sur un tamis de maille 5 mm et à consigner la masse de matière qui s'est écoulée à travers le tamis. Le pourcentage de laitance SR est donné par la relation :

$$SR = \frac{m_{PS} - m_p}{m_c} * 100$$

SR : laitance en pourcentage

m_{PS} : masse du fond de tamis plus masse de la laitance écoulée

m_p : masse du fond du tamis

m_c : masse initiale du béton placé sur le tamis

La stabilité du béton est satisfaisante si le pourcentage de laitance SR est inférieur ou égale à 95 %. Les données tirées de indiquent que le volume de pâte dans les formules de BAPL se situe entre 350 et 420 l/m³ et donc est 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. C'est pourquoi l'essai au tamis n'est pas recommandé pour qualifier la stabilité des bétons autoplaçants légers [6].

Selon [13], l'observation visuelle de la galette à l'état frais, l'essai à la colonne ou l'essai d'uniformité de la distribution granulaire par fendage à l'état durci sont les méthodes utilisées pour caractériser la stabilité des BAPL.

5-Propriétés mécaniques des BAPL

Les propriétés mécaniques des bétons légers sont intimement liées aux performances mécaniques et élastiques des granulats légers utilisés. D'après, 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.

ont fait une étude comparative de la rhéologie et des propriétés mécaniques entre un BAPL de schiste expansé et un BAPN. Les résultats montrent les propriétés à l'état frais (l'étalement au cône et le T400) des BAPL sont proches de celles des BAPN. En revanche, les auteurs notent que la résistance à la compression et le module d'élasticité des BAPL sont respectivement de 25% et 20% inférieurs aux valeurs du BAPN à dosage de ciment équivalent. Cette diminution des propriétés mécaniques des BAPL est soulignée par d'autres auteurs [18] et [20].

Les valeurs de résistance moyenne à la compression de 20 compositions issues de 12 articles recensés dans la littérature sont présentées à la Figure II.5. Nous constatons que la résistance

moyenne des bétons auto-plaçants légers est comprise entre 30 et 60MPa à l'exception des trois compositions de granulats de polystyrène expansé en cerclées sur la Figure II.5. Cette plage de résistances à la compression correspond à la gamme de résistances utilisée dans l'industrie du béton pour les produits de structure [6].

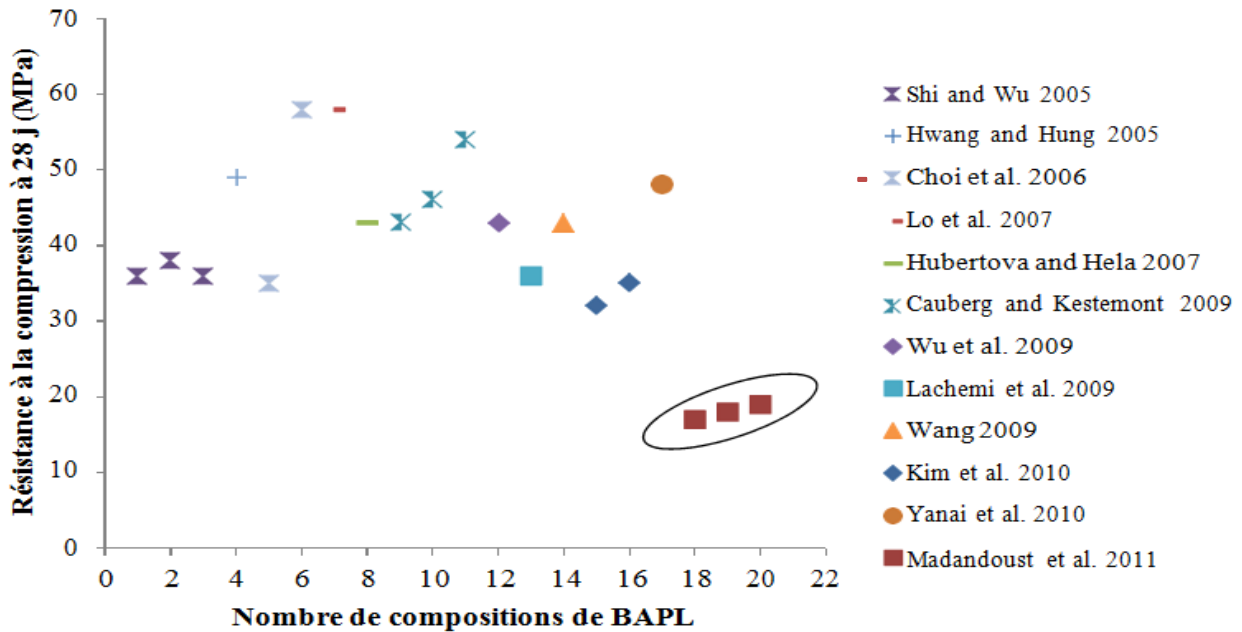


Figure II.5 : Résistance moyenne à la compression de BAPL identifiés dans la littérature

Par ailleurs, mentionnent que la masse volumique réelle sèche des bétons auto-plaçants légers se situent entre 1330 et 1990 kg/m³ soit une réduction de poids propre entre comprise entre 10 et 40 % comparée à un béton traditionnel de masse volumique réelle sèche de 2200kg/m³.

L'introduction de granulats légers dans le béton allège non seulement le matériau mais aussi donne des performances mécaniques proches de celles du béton traditionnel. Cette association de qualité en dépit de la faible rigidité des granulats légers comparée à celle de la matrice cimentaire est en partie liée à la porosité et à l'absorption des granulats légers. Les granulats légers développent des interactions physiques et mécaniques qui favorisent les propriétés à l'interface pâte/granat et améliorent les propriétés à l'état durci telles que la résistance et la durabilité [6].

6-Propriétés de Durabilité des BAPL

Il existe peu de travaux sur la durabilité des bétons auto-plaçants légers (BAPL). Cependant, l'effet positif de la cure interne apportée par les granulats légers pré-saturés est abondamment

citée dans la littérature. La cure interne consiste à substituer partiellement les granulats traditionnels par des granulats légers pré-saturés dans les bétons à faible rapport eau/ciment comme une source d'eau supplémentaire afin d'améliorer le degré d'hydratation du ciment dans la matrice durcie. Elle s'effectue pour la plupart sur des bétons de masse volumique normale à faible rapport eau/ciment dans lesquels une partie seulement des gravillons traditionnels est remplacée par des gravillons légers gorgés d'eau. Selon [21], ce phénomène a des effets positifs sur la fissuration au jeune âge et la durabilité des bétons contenant des granulats légers pré-saturés [6].

a montré que l'incorporation des granulats légers pré-saturés dans les bétons à très hautes performances (BTHP) permet de réduire la fissuration précoce et par conséquent de limiter la diffusion et la migration des agents agressifs tels que les chlorures et les sulfates [21] ont indiqué que la substitution partiellement des gravillons traditionnels par des gravillons légers pré-saturés en eau contribue à améliorer le degré d'hydratation de la matrice et à densifier l'interface autour des granulats légers. Selon les auteurs, cette densification de l'interface pâte/granat conduit d'une part à une réduction de l'absorption d'eau et de la perméabilité à l'eau et d'autre part, à un accroissement de la résistivité électrique du béton. Les résultats sur l'augmentation de la résistivité électrique des bétons contenant des granulats légers sont confirmés par [22] dont les travaux ont montré que la réduction de la quantité d'eau de gâchage (quantité d'eau de gâchage comprise entre 140 et 190 l/m³) permet de proposer des bétons auto-plaçants légers (BAPL) avec une résistivité électrique supérieure à 20 k Ω .cm (résistivité électrique sur BAPL âgé de 28 jours comprise entre 30 et 120 k Ω .cm); ce qui limiterait la corrosion des armatures d'après[23].[6]

Plus récemment, [25] ont montré que l'incorporation de granulats légers totalement saturés à l'eau réduit de façon significative le retrait total, l'auto-dessiccation et le retrait endogène au cours du durcissement du béton.

[24] et [25] concluent que les effets bénéfiques de la cure interne tels que l'amélioration du degré d'hydratation du ciment et la densification de l'interface pâte/granat réduisent la profondeur de pénétration des chlorures dans le béton contenant des granulats légers pré-saturés. A titre d'exemple, Les travaux de [25] montrent que la profondeur de pénétration des chlorures du béton contenant 35 % en volume de granulats légers pré-saturés est de $17,6 \pm 0,6$ mm tandis que celle du béton traditionnel est de $18,4 \pm 1,1$ mm. De même, [24] montre que le remplacement de 31 % en volume de sable normal par du sable léger de schiste expansé pré-saturés peut réduire de 25 % la diffusivité du mortier [6].

Par ailleurs,[26] montrent que la substitution du sable normal par du sable léger de schiste expansé réduit considérablement l'expansion du mortier comme l'illustre la Figure II.6. Ces résultats montrent qu'après 300 jours d'immersion dans une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4), les corps d'épreuve de mortier de sable léger ne présentent pas

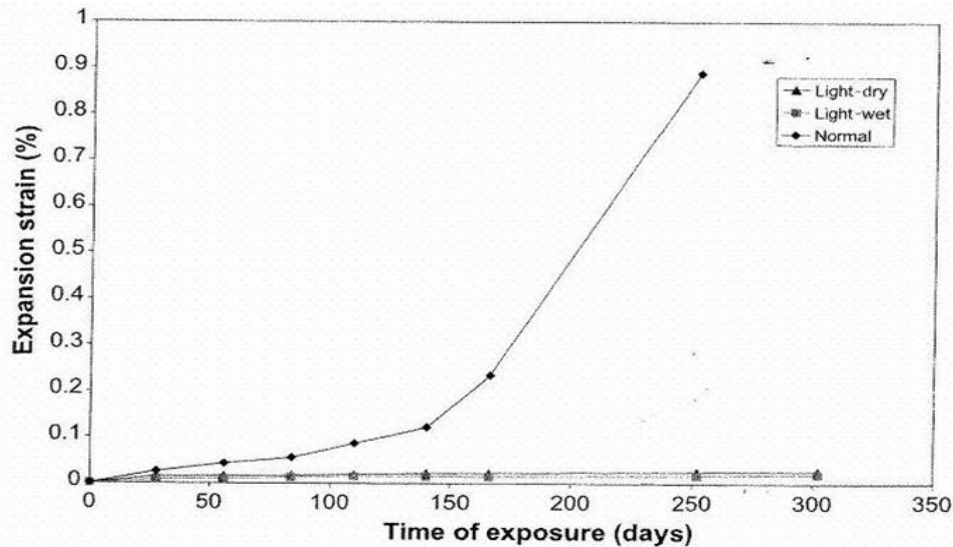


Figure II.6 : Expansion de prismes de mortiers avec un rapport eau/ciment égal à 0,55 après immersion dans une solution à 5 % de Na_2SO_4 pendant 300 jours

d'expansion significative tandis que l'expansion de ceux de mortier de sable normal est proche de 1 %. Les auteurs expliquent ces résultats par la densification de l'aurole de transition autour des grains de sable léger de schiste expansé. Ce constat est confirmé par les travaux de [25] sur des bétons légers contenant des granulats d'argile expansée. Cependant, il n'est pas possible de généraliser cette tendance à toutes les compositions de bétons légers car la résistance aux sulfates est intimement liée de la composition chimique du liant [6].

Dans le cas des bétons « tout léger » dans lesquels les granulats traditionnels (sable et gravillons) sont totalement remplacés par des granulats légers, le comportement vis-à-vis de la durabilité est défavorable comparé au béton traditionnel. Les travaux de [27] montrent que la profondeur de pénétration d'eau des bétons « tout léger » est deux fois plus importante que celle des bétons traditionnels testés dans les mêmes conditions opératoires. Ces résultats vont dans le même sens que les conclusions de [28]. De même, [27] montrent qu'à résistance équivalente, le béton « tout léger » se carbonate plus que le béton traditionnel indépendamment des conditions de cure du fait de sa perméabilité plus importante. Ces résultats se traduisent par une pente plus accentuée de la droite de corrélation entre la profondeur de carbonatation et la perméabilité à l'eau du béton « tout léger » comme l'illustre

la Figure II.7. Toutefois, les travaux de [29] ont montré auparavant qu'après cinq ans d'exposition à une ambiance atmosphérique normale, la profondeur de carbonatation mesurée sur des corps d'épreuve de bétons « tout léger » et de bétons traditionnels est inférieure à 1 mm [6].

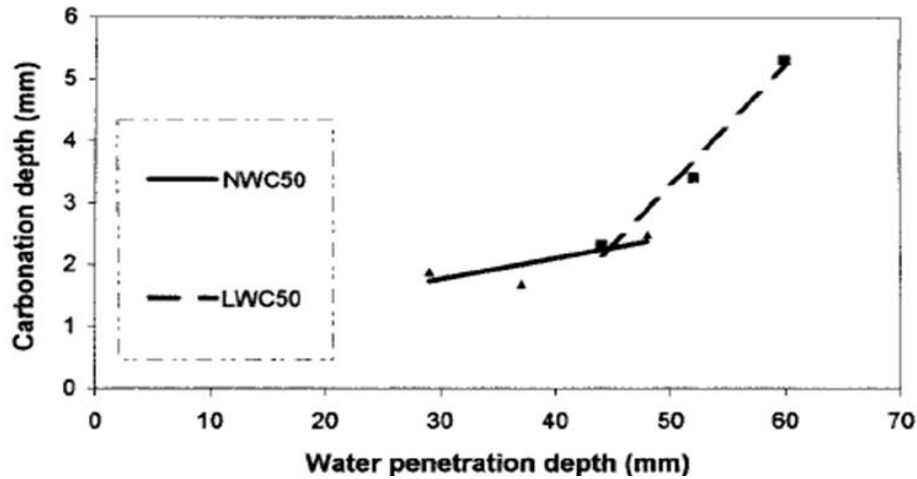


Figure II.7 : Corrélation entre profondeur de carbonatation et perméabilité à l'eau de deux bétons pour différentes conditions de cure et exposés pendant 2 ans à une atmosphère marine

Conclusion

La synthèse bibliographique s'est intéressée aux granulats légers, aux phénomènes de transfert hydrique pâte/granat ainsi qu'à l'impact de ces phénomènes de transfert d'eau en termes de conséquences sur la formulation et les propriétés des bétons légers. Cette synthèse a permis d'identifier l'absorption des granulats légers et la ségrégation des bétons légers comme étant les problématiques majeures dans le processus de formulation.

La synthèse montre l'importance de l'absorption et de la désorption des granulats légers sur l'ouvrabilité et les performances mécaniques et de durabilité des bétons légers. L'absorption du granulat léger dans la pâte réduit l'ouvrabilité du béton frais alors qu'elle améliore les propriétés à l'interface pâte/granat. La cure interne illustre parfaitement l'intérêt des granulats légers saturés d'eau comme une source d'eau additionnelle pour améliorer l'hydratation du ciment et réduire le retrait des bétons à faible rapport eau/ciment.

Par ailleurs, la synthèse montre que les méthodes de composition dédiées aux bétons autoplaçants légers conservent encore une grande part d'empirisme sans doute en l'absence d'outil

permettant de quantifier par exemple les transferts d'eau de la pâte vers le granulat léger et vice versa.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'absorption dans la pâte de ciment et de la comparer à l'absorption dans l'eau afin d'estimer avec plus de précision le rapport eau efficace /liant dans les bétons légers.

Cette étude vise également à proposer une approche de formulation plus rationnelle qui repose sur des grandeurs quantifiables telles que le volume de pâte, la concentration du liant, l'indice de serrage, l'indice de ségrégation, l'absorption dans la pâte de ciment. Cette méthode de formulation sera ensuite validée et mise en œuvre pour proposer des gammes de bétons autoplaçants légers dont les critères en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression sont conformes au cahier des charges.

Introduction

Ce chapitre traite campagne de caractérisation des bétons, Malaxage et conservation des éprouvettes en béton, propriétés physiques à l'état frais, les propriétés d'écoulement, Propriétés mécaniques et propriétés de durabilité

1-Campagne de caractérisation des bétons

Les bétons légers obtenus à partir de la méthode de formulation sont caractérisés à l'état frais et l'état durci. Les essais sur bétons sont répartis en quatre catégories comme l'indique le Tableau III.1. Les propriétés physiques sur bétons frais regroupent les essais de masse volumique réelle, de teneur en air et d'indice de ségrégation. Les propriétés d'écoulement sont évaluées par des essais technologiques tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à l'entonnoir en V et l'essai de remplissage de la boîte en L. Les propriétés mécaniques à l'état durci regroupent la résistance à la compression, la traction par fendage et le module d'élasticité. Les propriétés de durabilité rassemblent la porosité accessible à l'eau, l'absorption et la carbonatation accélérée. Les essais sur bétons sont réalisés à divers âges et sur différents types de corps d'épreuve.

Tableau III.1 :Essais réalisés sur les formules de béton

Catégorie d'essais	Paramètres	Échéances (jours)	Conditions de cure	Dimensions des corps d'épreuve	Nombre	Référence normative
Propriétés Physiques	Densité réelle (A)	-	-	-	1	NFEN12350-6
	Teneur en air (A)	-	-	-	1	NFEN12350-7
	Densité réelle Et teneur en air (R)	-	-	-	1	ASTMC173

1-1-Malaxage et conservation des éprouvettes en béton

Les bétons sont fabriqués dans un malaxeur à cuve fixe et à train valseur d'une capacité utile de 80 litres. Les conditions de fabrication sont proches des conditions ambiantes. Deux techniques de malaxage sont utilisées. La première consiste à incorporer les gravillons légers dans le malaxeur après avoir préparé le mortier. La seconde consiste à mélanger les gravillons légers et le sable dans un premier temps pour ensuite rajouter les autres constituants tels que le liant, l'eau et l'adjuvant. Les deux techniques conduisent à un temps de malaxage assez proche même si la première offre l'avantage de contrôler la fluidité du mortier avant l'incorporation des gravillons légers. L'ajout de l'adjuvant se fait en une ou deux étapes selon la technique choisie [6].

Le temps de malaxage est d'environ 30 minutes. Dans le cas des gravillons légers pré-mouillés, le temps de malaxage peut être plus long. La procédure de malaxage d'après la première technique d'introduction des constituants est décrite à la Figure III.1.

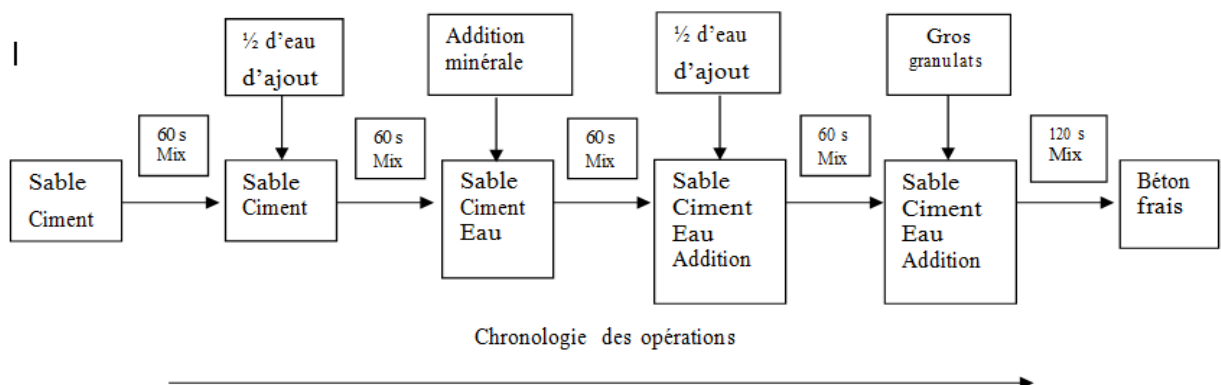


Figure III.1 : Procédure d'introduction des constituants au cours du malaxage

Le remplissage des moules est exempt de toute vibration et tout choc extérieur. Les moules remplis de béton sont entreposés dans une salle régulée à 20 °C pendant 24 heures. Les corps d'épreuves sont recouverts en partie supérieure de film polyane afin de prévenir la dessiccation précoce au jeune âge. Après démoulage, les corps d'épreuves sont transférés dans une salle humide régulée à 20 °C avec une humidité relative supérieure à 95 % et conservés jusqu'à l'échéance des essais. Au total, plus de six cents corps d'épreuves ont été confectionnés et testés [6].

2-Propriétés physiques à l'état frais

2-1-Masse volumique réelle et teneur en air occlus

La masse du béton frais après malaxage est mesurée et rapportée au volume d'un récipient rigide et étanche dont le volume et la masse sont connus. Le serrage à refus dans le cas des bétons auto-plaçants est naturel par essence et ne nécessite pas de vibration additionnelle. La masse volumique réelle du béton est déterminée selon deux procédures distinctes : la procédure décrite dans la norme NF EN 12350-6 à l'aide de l'aéromètre (d'un volume de 8 litres) et le mode opératoire de la norme ASTM C173 à l'aide du roll-a-meter (d'un volume de 2,1 litres). La masse volumique réelle des bétons légers à l'état frais, n'excède pas à 2 200 kg/m³ d'après la norme NF EN 1992-1-1.

La teneur en air occlus est mesurée par la méthode du manomètre (aéromètre) décrite par la norme NF EN 12350-7 et par la méthode volumétrique (roll-a-meter) selon la norme ASTM C 173. La méthode du manomètre utilise la compressibilité de l'air selon le principe de la loi de Boyle-Mariotte qui relie la pression (p) et le volume (V) d'un gaz réel à température constante. Cette loi s'exprime entre deux états (1) et (2) par la relation $p_1V_1 = p_2V_2$

L'essai à l'aéromètre (voir Figure III.2-a) consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton serré de volume connu se trouvant dans une enceinte hermétique et à appliquer sur l'eau, une pression d'air prédéterminée. La diminution de la pression d'air situé dans le compartiment supérieur de l'appareil est proportionnelle à la quantité d'air occlus contenu dans l'échantillon de béton. Cette méthode (essai à l'aéromètre) n'est pas applicable aux bétons de granulats légers en raison de la grande porosité de ces matériaux. Cependant, elle a été expérimentée pour identifier une corrélation éventuelle avec la méthode volumétrique (essai au roll-a-meter) [6].



a) Aéromètre à béton d'un volume de 8 litres (A)



(b) Roll-a-meter d'un volume de 2,1 litres (R)

Figure III.2 : Appareils de mesure de masse volumique réelle et de teneur en air

L'essai au « roll-a-meter » (voir Figure III.2 -b) consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus de l'échantillon de béton serré de volume connu et à secouer l'enceinte hermétique selon une cadence définie. La diminution du volume d'air contenu dans l'échantillon de béton est mesurée en observant la baisse du niveau d'eau, la colonne d'eau étant étalonnée en pourcentage d'air de l'échantillon de béton. Comparativement à l'aéromètre, il n'y a pas de pression d'air prédéterminée appliquée sur l'eau. L'absence de pression d'air additionnelle élimine le biais que peut induire l'air emprisonné dans les granulats poreux.

Le Tableau III.2 donne des valeurs de masse volumique réelle et de teneur en air mesurées avec un aéromètre et un roll-a-meter pour des BAPL formulés à partir de deux rapports E_{eff}/L et trois valeurs de volume de pâte. Les masses volumiques réelles mesurées à l'aide de l'aéromètre sont inférieures à celles correspondant au roll-a-meter sans doute en raison de l'effet d'échelle. Pour mémoire, le volume de l'aéromètre est quatre fois plus grand que celui du roll-a-meter. La masse volumique réelle mesurée avec l'aéromètre à béton reste la plus représentative et sera la méthode de référence utilisée pour évaluer la masse volumique réelle à l'état frais des formules de BAPL proposées [6].

Tableau III.2 : Masse volumique réelle et teneur en air occlus mesurées à l'aéromètre et au « roll-a-meter »

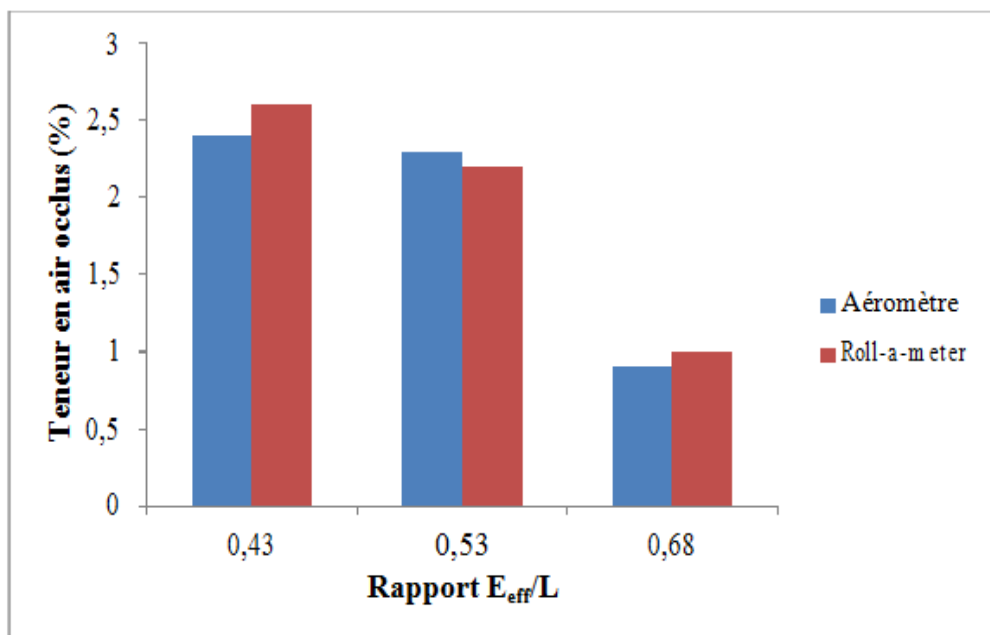
Paramètres	Type d'appareil	Rapport $E_{eff}/l = 0.35$			Rapport $E_{eff}/l = 0.55$		
		350	400	450	350	400	450
Volume de pâte		350	400	450	350	400	450
Mass volumique réelle (kg/m ³)	Aéro-mètre (A)	1926	1947	1952	1884	1858	1841
	Roll-a-mètre (R)	1969	1989	2015	1903	1925	1903
Teneur en air (%)	Aéro-mètre (A)	6.5	7.5	6.4	9.5	10.0	8.6
	Roll-a-mètre (R)	1.5	2.1	1.7	4.1	3.3	2.6

Les teneurs en air mesurées à l'aéromètre pour les deux rapports E_{eff}/L et pour les trois volumes de pâte sont beaucoup plus élevées par rapport aux données de la littérature sur les bétons légers sans agent entraîneur d'air. Le facteur de correction lié au granulat devient prépondérant en présence de granulats légers et impacte significativement la teneur en air réelle du béton. En revanche, les teneurs en air mesurées à l'aide du roll-a-meter sont plus proches des valeurs habituelles (teneur en air inférieure à 3 % du volume du béton) pour ce type de matériau. L'absence de pression additionnelle conduit certainement à une mesure de la teneur en air occlus qui n'est pas perturbée par l'air emprisonné dans les pores des granulats légers [6].

Tableau III.3:Composition en kg/m³ de mor---tiers pour la validation de mesure de la teneur en ai -roclus

Constituants	RapportEeff/		
	0,43	0,53	0,68
Sable naturel	1456	1473	1485
Ciment	437	385	344
Addition calcaire	137	120	108
Super plastifiant	0,86	0,42	0,08
Eau efficace	247	270	306
Masse volumique réelle théorique(kg/m ³)	2443	2385	2359

Pour légitimer l'utilisation du roll-a-meter, les essais ont été étendus aux mortiers de sable normal dont les compositions sont présentées au Tableau III.3. Les teneurs en air mesurées à l'aide de l'aéromètre à mortier (d'un volume de 1 litre) et du roll-a-meter (d'un volume de 2,1 litres) sont comparées sur les trois mortiers de différents rapports Eeff/L. Les résultats présentés sur la Figure III.3 indiquent que les valeurs de teneur en air occlus mesurées à l'aide de l'aéromètre à mortier sont similaires à celles mesurées sur le roll-a-meter pour les trois mortiers



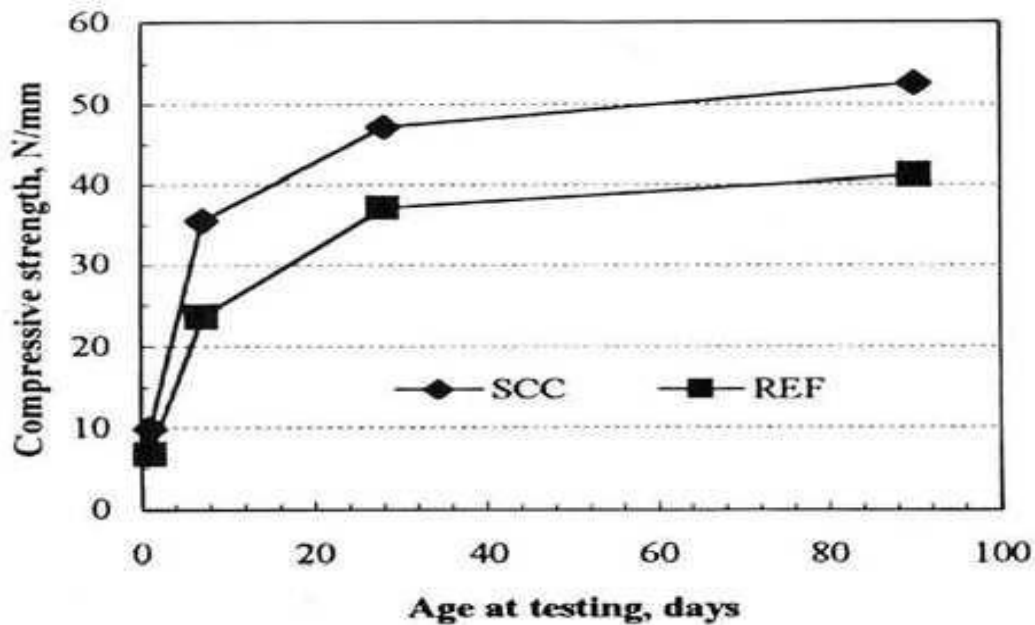


Figure III.3 : Comparaison de masse volumique et teneur en air entre l'aéromètre et le roll-a-meter [6]

La teneur en air mesurée à l'aide du roll-a-meter est donc la plus représentative pour qualifier les bétons légers et sera la méthode de référence utilisée pour évaluer la teneur en air occlus du béton frais dans la phase de validation expérimentale [6].

2-2-Indice de ségrégation statique

La ségrégation se manifeste dans le béton par une séparation de phases (pâte/granulat, granulats/granulats ou eau/squelette granulaire) dans le mélange sous l'effet des interactions dissipatives (gravité, vibration ou chocs externes). Elle peut être statique ou dynamique. Dans le cas particulier des bétons formulés avec une quantité d'eau de gâchage relativement importante, une séparation entre l'eau et le squelette granulaire peut s'opérer et engendrer une remontée d'eau à la surface du béton. On parle de ressuage du béton [6].

Dans le cas des bétons auto-plaçants (BAP), la séparation entre phases est souvent due à la gravité puisque le serrage à refus du béton est naturel. Dans les bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN), la ségrégation statique est engendrée par une séparation entre le

mortier et les gravillons légers. La différence de masse volumique réelle entre le mortier de sable normal et les gravillons légers peut occasionner une ségrégation due à l'action de la gravité. Les gravillons légers migrent préférentiellement vers le dessus du moule comme le montre l'illustration de la Figure III.4. Par ailleurs, les bétons auto-plaçants légers de sable léger (BAPLSL) peuvent présenter une ségrégation due à la gravité entre les grains légers de différentes tailles. Les plus gros grains (avec un indice d'expansion plus élevé et donc plus léger) remontent vers la surface du béton. Dans un BAPL ségrégué, la ségrégation entre phases solide/solide s'accompagne souvent d'une ségrégation liquide/solide [6].

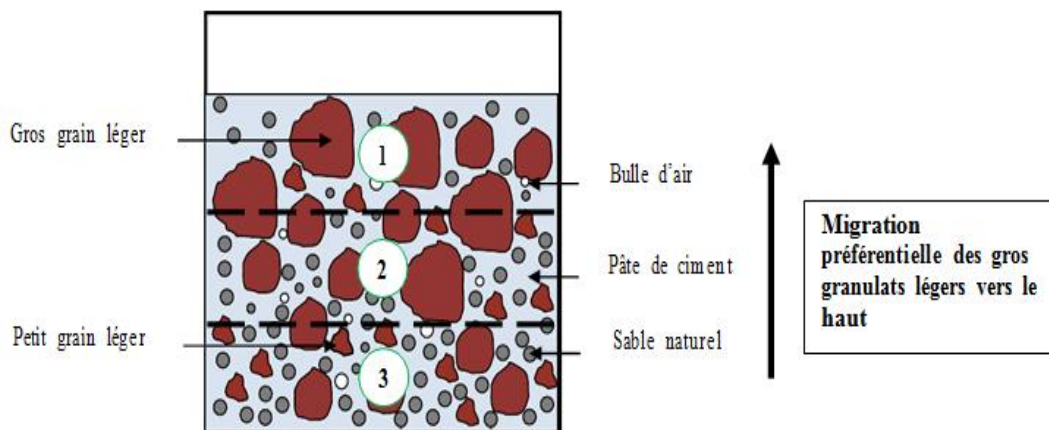


Figure III.4 : Physique de la ségrégation dans les bétons légers[6]

Ce phénomène peut entraîner à l'état frais, une hétérogénéité de masse entre les parties du béton (haute, centrale et basse) respectivement 1 2 et 3 sur la Figure 2.10 lors du remplissage d'une colonne cylindrique par exemple. A l'état durci, la ségrégation du béton engendre des variations spatiales des propriétés mécaniques et de durabilité.

Pour qualifier la ségrégation statique des BAPL proposés, des essais de stabilité à la colonne sont effectués afin de déterminer un indice de ségrégation statique. L'indice de ségrégation est déterminé sur béton frais à l'aide de l'essai à la colonne. L'essai consiste à remplir d'un seul tenant une colonne cylindrique de 450 mm de hauteur et 150 mm de diamètre (voir Figure III.5). La colonne est constituée de trois cylindres identiques de 150 hauteur chacun, intercalés de joints. L'étanchéité des joints est assurée par une ceinture étanche et amovible. Le béton déversé dans la colonne est laissé au repos pendant 30 à 60 minutes. Le contenu de chaque cylindre est recueilli et lavé à l'eau sur un tamis de 4 mm. Le refus sur le tamis est

séché à l'étuve jusqu'à masse constante à 105 °C. La masse de granulat dans les cylindres du haut, du centre et du bas est ainsi déterminée. Ces mesures vont permettre de déterminer un coefficient de variation qui est pris comme l'indice de ségrégation. L'indice de ségrégation est calculé d'après l'expression suivante :

$$I_{seg}(\%) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100$$

σ : écart type des masses de refus pour les trois cylindres de la colonne.

μ : moyenne des masse de refus pour les trois cylindres de la colonne .

D'après les données de (Wu et al. 2009)[13]. sur des bétons auto-plaçants d'ardoise expansée, plus l'indice de ségrégation déterminé comme sus-décri est faible, plus la distribution des granulats entre les trois parties de la colonne est uniforme. Selon les auteurs, la valeur de l'indice de ségrégation ne doit pas excéder 5 % pour être appropriée [6].



Colonne cylindrique de 150x450 mm

Cylindres de 150x150mm

Figure III.5 : Essai de ségrégation à la colonne

3-Les propriétés d'écoulement

La mobilité et la résistance au blocage dans un milieu confiné des BAPL sont testées à partir de trois paramètres technologiques que sont :

- l'étalement au cône d'Abrams .
- le temps de passage à l'entonnoir en V .

- le taux de remplissage à la boîte en L.

3-1-Essai d'étalement au cône d'Abrams

L'essai d'étalement consiste à déterminer le diamètre moyen de la galette de béton frais obtenu après soulèvement du cône préalablement rempli (voir Figure III.6). Le plus grand diamètre d'étalement (d_1) et le diamètre de l'étalement perpendiculaire (d_2) sont mesurés, l'étalement étant le diamètre moyen. L'étalement noté SF est la moyenne de d_1 et d_2 donnée par l'équation suivante :

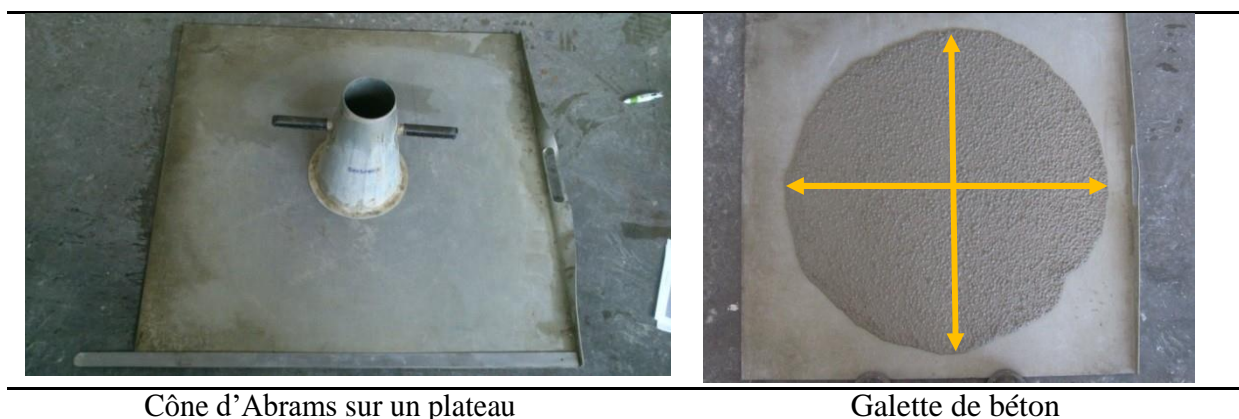
$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

L'étalement constitue un essai de fluidité qui permet d'indiquer la capacité de remplissage du béton auto-plaçant en milieu non confiné. Il permet également de définir la classe d'étalement du béton auto-plaçant selon les indications du Tableau III.4 tiré de la norme NF EN 206-9 [6].

Tableau III.4 :Classes d'étalement

Classe	Etalement en mm
SF1	550à650
SF2	660à750
SF3	760à850

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



Cône d'Abrams sur un plateau

Galette de béton

Figure III.6 :Essai d'étalement au cône d'Abrams

3-2-Essai d'écoulement à l'entonnoir en V

Un entonnoir en forme de V est rempli de béton frais afin de mesurer le temps nécessaire en secondes à l'écoulement du béton hors de l'entonnoir (voir Figure III.7). Le temps d'écoulement à l'entonnoir en V noté t_V permet d'évaluer la capacité de remplissage du béton auto-plaçant et donne une indication sur la viscosité apparente. Les deux classes de viscosité apparente sont indiquées dans le Tableau III.5 tiré de la norme NF EN 206-9. En général, le temps d'écoulement des BAPL se situe entre 3 et 25 secondes [6].



Entonnoir en V



Chronomètre

Figure III.7 : Appareillage de mesure de la capacité de remplissage[6]

Tableau III.5 :Classes de viscosité apparente

Classe	Temps (s) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
VF1	<9,0
VF2	9,0à25,0

3-3-L'essai à la boîte en L

L'essai consiste à déverser du béton frais dans le compartiment vertical d'une boîte en forme de L puis à laisser s'écouler le béton dans le compartiment horizontal à travers les espaces entre les barres d'armatures lisses et verticales (voir Figure III.8). Les hauteurs du niveau de béton dans la partie vertical (H1) et à l'extrémité de la partie horizontale (H2) sont mesurées et le rapport H2/H1 est déterminé. Ce rapport qui représente le taux de remplissage à la boîte en L noté PL, permet de mesurer l'aptitude à l'écoulement ou au blocage du béton auto-plaçant en milieu confiné. Il renseigne sur la résistance à la ségrégation dynamique en

présence d'obstacle. Deux classes d'aptitude à l'écoulement sont considérées selon l'espacement entre les barres d'armatures lisses comme l'indique le Tableau III.6 extrait de la norme NF EN 206-9. Les BAPL présentés dans la littérature indiquent un taux de remplissage compris entre 0,75 et 0,90 [6].

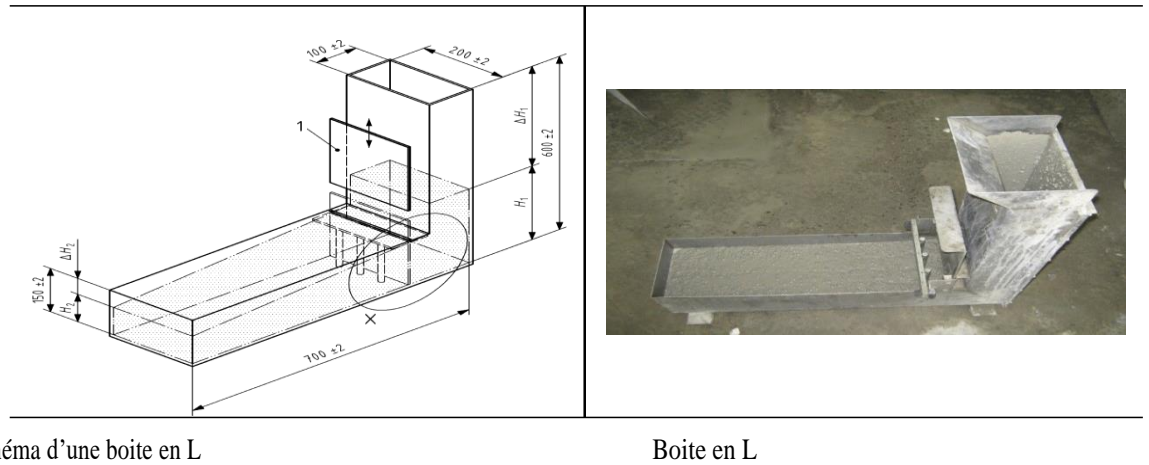


Figure III.8 :Appareillage de mesure de l'aptitude à l'écoulement

Les BAPL formulés sont caractérisés avec le système de positionnement de 3 barres. Un moule transparent est confectionné pour vérifier l'aptitude à l'écoulement en milieu non confiné et l'état du parement après mise en place du béton (voir Figure III.9).



Figure III.9:moule transparent[6]

Tableau III.6:Classes d'aptitude à l'écoulement

Classe	Taux de remplissage
PL1	≥0,80avec2armatures
PL2	≥0,80avec3armatures

4-Propriétés mécaniques

Les essais destructifs sont réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques des BAPL formulés. Ces essais sont réalisés sur différents types d'éprouvette et à divers âges.

4-1-Résistance à la compression

L'évolution de la résistance moyenne à la compression est réalisée à partir d'éprouvettes cubiques 10x10 cm pour trois âges (1, 28 et 90 jours). A chaque échéance, l'essai est répété sur six éprouvettes et la valeur moyenne de la résistance à la compression est calculée pour la présentation des résultats. La résistance caractéristique (f_{ck}) pour définir la classe de résistance du béton est évaluée d'après la relation ci-dessous, connaissant la valeur moyenne de la résistance à la compression à 28 jours sur trois éprouvettes cubiques 15*15 cm (f_{cm}):

$$f_{cm}=f_{ck}+8MP$$

4-2-Traction par fendage

La traction par fendage est exécutée sur des corps d'épreuve cylindriques 11*22 cm à 28 et 90 jours d'âge. Un dispositif adapté est intégré à la presse pour réaliser l'essai conformément la norme NF EN 12390(Figure III.10) [6].



Résistance à la compression

Traction par fendage

4-3-Module d'élasticité

Des éprouvettes cylindriques 11*22 cm sont équipées d'extensomètres à fils résistants connectés à une centrale d'acquisition qui permet d'enregistrer les déplacements au cours des cycles de chargement/déchargement de l'éprouvette. Chaque éprouvette est équipée de trois jauges de déformation disposées sur trois génératrices ayant un écart angulaire de 120 °C entre elles.

Le module d'élasticité du béton est déterminé sur des éprouvettes cylindriques 11*22 âgées de 28 et 90 jours. Selon la norme ISO DIS 1920-10, trois cycles de chargement/déchargement sont réalisés dans une plage de mesure comprise entre 10 kN et une charge équivalente au tiers de la force de rupture. Préalablement, la force de rupture est déterminée à partir de la valeur moyenne de la résistance à la compression sur trois éprouvettes cylindriques 11*22 cm. L'essai est réalisé à force imposée telle que la vitesse de montée de charge soit égale à 0,5 MPa /s. La Figure III.10 présente les cycles de chargement/déchargement. A l'issue de l'essai, la courbe contrainte/déformation est tracée pour en déduire le module d'élasticité du béton. Le module est obtenu en moyennant sur trois essais, le coefficient directeur de la droite contrainte/déformation du deuxième et du troisième cycle. Selon la norme NF EN 1992-1-1, le module d'élastique du béton léger peut être évalué par l'expression suivante : [6].

$$E_{lcm} = E_{cm} \cdot 5E$$

E_{cm} : module d'élasticité du béton de masse volumique normale de résistance équivalente

5E : coefficient compris entre 0,21 et 0,83 pour les bétons léger de structure.

Pour les bétons légers courants, le coefficient est de 0,53.

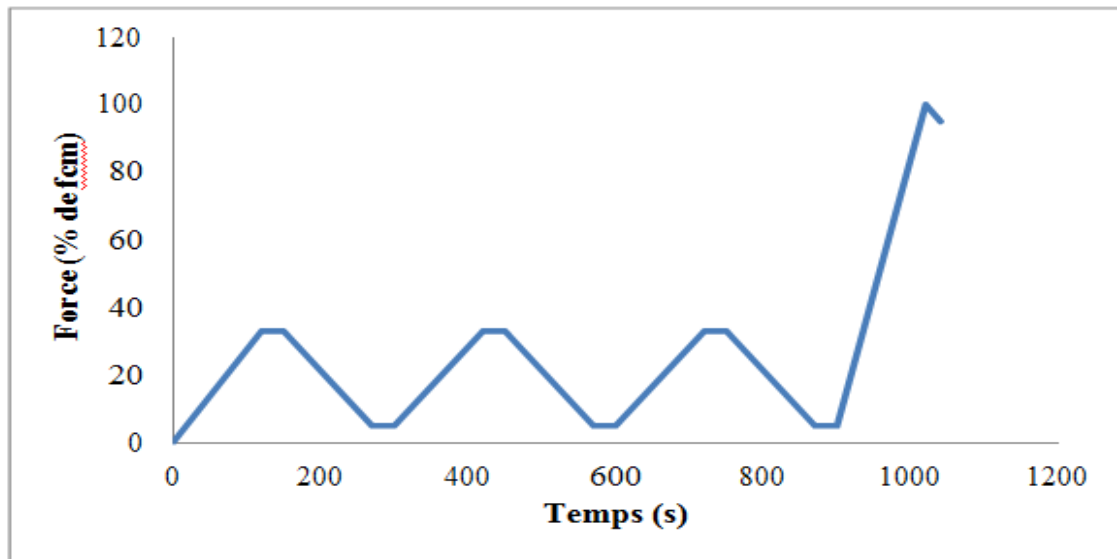


Eprouvette équipée de jauges de déformation



Module d'élasticité

Figure III.10 : Dispositifs d'essais de résistance et de rigidité[6]

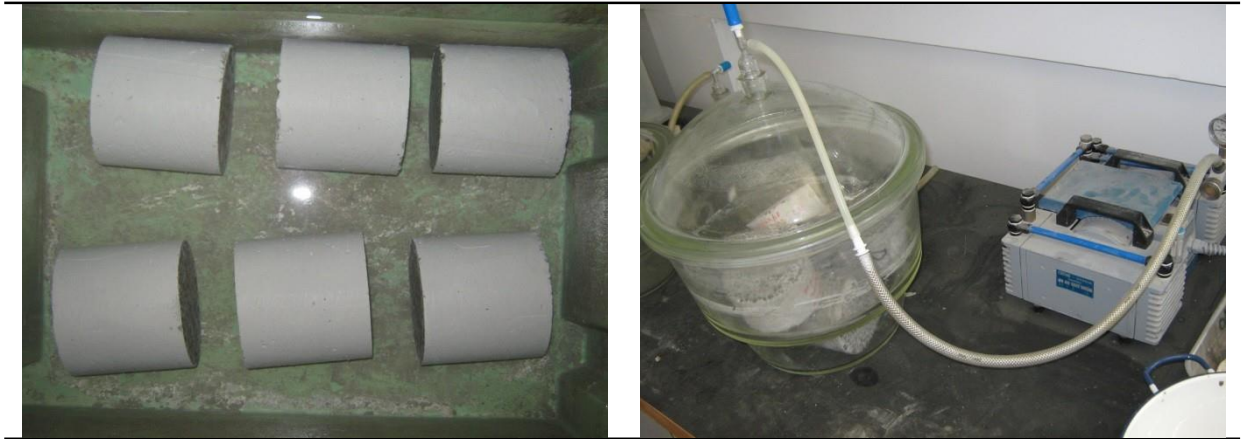


5-Propriétés de durabilité

La durabilité des BAPL proposées est évaluée par l'essai de porosité accessible à l'eau, d'absorption dans l'eau et de carbonatation accélérée.

5-1-Absorption et porosité accessible à l'eau

Les essais d'absorption d'eau et de porosité accessible à l'eau consistent à mesurer la porosité d'un échantillon de béton par absorption respectivement à pression atmosphérique et sous vide (voir Figure III.11). Les corps d'épreuve en forme de cylindre tronqué de hauteur comprise entre 50 et 110 mm et de diamètre 110 mm sont moulés pour les essais d'absorption et de porosité accessible à l'eau. Le sciage des corps d'épreuve de bétons légers met à nu les pores du granulat sur le faciès de découpe et engendre une absorption anormale du béton. C'est la raison pour laquelle les bétons légers n'entrent dans le domaine d'application de la norme NF P 18-459 relative à l'essai de porosité et masse volumique réelle à l'état durci. Pour y remédier, les éprouvettes dédiées aux essais d'absorption et de porosité accessible à l'eau ont donc été moulés. A l'issue de l'essai, le coefficient d'absorption, la porosité et la masse volumique réelle sèche du béton sont déterminés [6].



Immersion complète dans l'eau d'éprouvettes pour absorption Mise sous vide d'éprouvettes pour la porosité accessible

A l'eau

Figure III.11 : Absorption et porosité accessible à l'eau[6]

L'absorption d'eau du béton notée W est donnée par l'expression ci-après :

$$W(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100$$

M1 : Masse de l'éprouvette après absorption jusqu'à masse constante en g.

M2 : Masse de l'éprouvette après séchage jusqu'à masse constante à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ en g.

La porosité accessible à l'eau s exprimée en pourcentage volumétrique est donnée par l'équation :

$$s(\%) = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} * 100$$

M_{air} : masse à l'air de l'éprouvette saturée en g .

M_{sec} : masse de l'éprouvette séchée jusqu'à masse constante à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ en g .

M_{eau} : masse déjaugée de l'éprouvette saturée en g .

La masse volumique réelle sèche ρ_d exprimée en kg/m^3 est donnée par l'équation :

$$\rho_d = \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \rho_{\text{eau}}$$

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ en kg/m^3

5-2-Carbonatation

L'essai de carbonatation accélérée consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur carbonatée du béton sur des corps d'épreuve prismatiques 7*7*28 cm. Les éprouvettes sont antérieurement conservées pendant 28 jours dans une salle humide à une température de 20 °C et une humidité relative supérieure à 95 %. Les corps éprouves sont ensuite pré-conditionnés dans une ambiance contrôlée en température (20 ± 2 °C) et en humidité (65 ± 5 %) pendant 14 jours avant d'être placés dans l'enceinte de carbonatation (voir Figure III.12-a). L'enceinte étanche et ventilé est alimentée par un flux continu de dioxyde de carbone maintenu à 4 % à l'aide d'un analyseur. Aux échéances de 7 et 28 jours, les éprouvettes sont retirées de l'enceinte et sont cassées de façon à avoir une surface plane et fraiche sur laquelle la phénolphaléine est pulvérisée. Les épaisseurs de la zone carbonatée qui reste incolore sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse (voir Figure III.12-b) pour déterminer l'épaisseur du béton carbonaté[6].

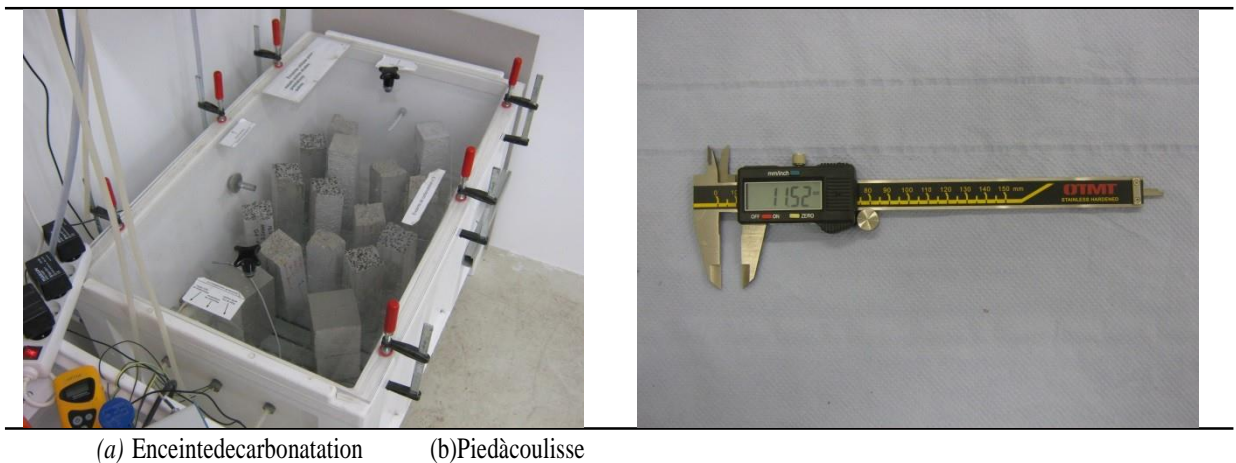


Figure III.12 : Dispositif d'essai de carbonatation accélérée [6]

Conclusion

La méthode de composition proposée se distingue par la réduction de la demande en eau des granulats légers grâce au protocole d'absorption dans la pâte développé dans la thèse. L'essai d'absorption dans la pâte va permettre d'affiner la quantité d'eau absorbable par les granulats légers et donner une estimation de la teneur en eau efficace plus proche de celle dans le béton. Pour minimiser l'impact de cette problématique d'absorption sur l'ouvrabilité du béton, un protocole de pré-mouillage est proposé pour assurer un maintien de rhéologie satisfaisant aux bétons auto-plaçants légers formulés. La combinaison de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment et de l'essai de pré-mouillage des granulats légers permettra d'améliorer la compacité du béton frais tout en assurant son caractère auto-plaçant.

Les bétons auto-plaçants légers vont être caractérisés avec des méthodes usuelles décrites et mais aussi par des méthodes spécifiques notamment pour définir leur aptitude à la ségrégation. La résistance à la ségrégation statique du béton frais sera mesurée à l'aide d'une colonne cylindrique pour définir in fine un indice de ségrégation. L'indice de ségrégation permettra de se positionner sur l'aptitude à la ségrégation du béton. Par ailleurs, la caractérisation de la teneur en air des bétons auto-plaçants légers sera réalisée à l'aide du « roll-a-meter » qui mesure la teneur en air du béton sans perturber l'air emprisonné dans le réseau poreux des granulats légers et permet de s'affranchir du biais induit par la présence d'air occlus dans les granulats poreux.

Conclusion générale

La porosité des granulats légers est déterminante pour les propriétés thermiques et hydriques des bétons légers. Elle régit les transferts d'eau entre la pâte et les granulats et vice-versa. Ces transferts influent sur le comportement à l'état frais et l'état durci des bétons légers. Une forte absorption des granulats légers peut engendrer un raidissement précoce préjudiciable au bon maintien de rhéologie du béton. A contrario, l'introduction de granulats légers préalablement saturés d'eau dans des bétons à faible rapport eau/ciment agit comme une source additionnelle d'eau pour assurer une cure interne bénéfique à l'hydratation.

La synthèse bibliographique s'est intéressée aux granulats légers, aux phénomènes de transfert hydrique pâte/granat ainsi qu'à l'impact de ces phénomènes de transfert d'eau en termes de conséquences sur la formulation et les propriétés des bétons légers. Cette synthèse a permis d'identifier l'absorption des granulats légers et la ségrégation des bétons légers comme étant les problématiques majeures dans le processus de formulation.

La synthèse montre l'importance de l'absorption et de la désorption des granulats légers sur l'ouvrabilité et les performances mécaniques et de durabilité des bétons légers. L'absorption du granulat léger dans la pâte réduit l'ouvrabilité du béton frais alors qu'elle améliore les propriétés à l'interface pâte/granat. La cure interne illustre parfaitement l'intérêt des granulats légers saturés d'eau comme une source d'eau additionnelle pour améliorer l'hydratation du ciment et réduire le retrait des bétons à faible rapport eau/ciment.

Cette étude vise également à proposer une approche de formulation plus rationnelle qui repose sur des grandeurs quantifiables telles que le volume de pâte, la concentration du liant, l'indice de serrage, l'indice de ségrégation, l'absorption dans la pâte de ciment. Cette méthode de formulation sera ensuite validée et mise en œuvre pour proposer des gammes de bétons auto-plaçants légers dont les critères en termes de masse volumique réelle sèche et de résistance à la compression sont conformes au cahier des charges

La méthode de composition proposée se distingue par la réduction de la demande en eau des granulats légers grâce au protocole d'absorption dans la pâte développé dans la thèse. L'essai d'absorption dans la pâte va permettre d'affiner la quantité d'eau absorbable par les granulats légers et donner une estimation de la teneur en eau efficace plus proche de celle dans le béton. Pour minimiser l'impact de cette problématique d'absorption sur l'ouvrabilité du béton, un protocole de pré-mouillage est proposé pour assurer un maintien de rhéologie satisfaisant aux

bétons auto-plaçants légers formulés. La combinaison de l'essai d'absorption dans la pâte de ciment et de l'essai de pré-mouillage des granulats légers permettra d'améliorer la compacité du béton frais tout en assurant son caractère auto-plaçant.

Les bétons auto-plaçants légers vont être caractérisés avec des méthodes usuelles décrites et mais aussi par des méthodes spécifiques notamment pour définir leur aptitude à la ségrégation. La résistance à la ségrégation statique du béton frais sera mesurée à l'aide d'une colonne cylindrique pour définir in fine un indice de ségrégation. L'indice de ségrégation permettra de se positionner sur l'aptitude à la ségrégation du béton. Par ailleurs, la caractérisation de la teneur en air des bétons auto-plaçants légers sera réalisée à l'aide du « roll-a-meter » qui mesure la teneur en air du béton sans perturber l'air emprisonné dans le réseau poreux des granulats légers et permet de s'affranchir du biais induit par la présence d'air occlus dans les granulats poreux.

References bibliographiques

- [1] BREMNER T. W., Holm T. A. and Stepanova V. F. (1994) Lightweight concrete: A proven material for two millennia Proceedings of Advances in Cement and Concrete, University of New Hampshire, Durham.
- [2] DOUARA Taha -Hocine , Effets des différents régimes de durcissement sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant à base de divers types de sable, 2019.
- [3] FARES Hanaa, Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée, 2009.
- [4] MOHAMED A S Mohamed, Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, 2011.
- [5] HERIHIRI Ouided, Formulation et Caractérisation des Bétons Légers, 2010.
- [6] LATIFOU BELLO , Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables, 2014.
- [7] HELLAND S., Holand I. and Smeplass S. (2000) Structural LWAC. Specification and guideline for materials and production Edition 2nd International symposium on Structural lightweight aggregate concrete. Kristiansand 18-22 June 2000 Norwegian Concrete Association.
- [8] NEVILLE A. M. (1995) Properties of concrete Fourth and Final Edition. – 1995.
- [9] ZHANG D., Li Z., Zhou J. and Wu K. (2004) Development of thermal energy storage concrete Cement and Concrete Research (2004).
- [10] PAPANICOLAOU G. C. and Kaffetzakis M. I. (2011) Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art & Pumice Application Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 9 n°.1

- [11] KIM Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. (2010) Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates Construction and Building Materials (2010).
- [12] UYGUNOGLU T. (2008) Properties of Self-Consolidating Lightweight Aggregate Concrete PhD thesis, Süleyman Demirel University in Turkish – 2008.
- [13] WU Z., Zhang Y., Zheng J., Ding Y. (2009) An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete Construction and Building Materials 2009.
- [14] HUBERTOVA M. and Hela R. (2007) The effect of metakaolin and silica fume on the properties of lightweight self-compacting concrete ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Warsaw 20-25 May 2007. SP-243, American Concrete Institute.
- [15] CAUBERG N. and Kestemont X. (2009) Lightweight self-consolidating concrete: systematic approach and case study BFT International 08/2009
- [16] BANFILL P. F. G. (2011) Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures Construction and Building Materials (2011)
- [17] BANFILL P. F. G. (2011) Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures Construction and Building Materials (2011)
- [18] CHOI Y. W., Kim Y. J., Shin H. C. and Moon H. Y. (2006) An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight selfcompacting concrete Cement and Concrete research (2006).
- [19] KASZYNSKA M. (2010) Effect of aggregate mix composition on lightweight self-consolidating concrete International Rilem Conference on Self Compacting Concrete. Canada 2010.

[20] Kim Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. (2010) Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates *Construction and Building Materials* 24 (2010).

[21] HENKENSIEFKEN R., Bentz D. P., Nantung T., Weiss J. (2009) Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions *Cement & Concrete Composites* (2009).

[22] Hwang C. L. and Hung M. F. (2005) Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete *Construction and Building Materials* (2005).

[23] BUENFELD N. R., Newman J. B., Page C. L. (1986) The resistivity of mortar immersed in seawater. *Cement and Concrete Research* (1986).

[24] BENTZ D. P. (2009) Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars *Cement & Concrete Composites* 31 (2009).

[25] Liu X., Chia K. S. and Zhang M. H. (2010) Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration *Cement & Concrete Composites* 32 (2010).

[26] ELSHARIEF A., Menashi D., Olek J. (2005) Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar *Cement and Concrete Research* 35 (2005).

[27] HAQUE N. and Al-Khaiat H. (1999) Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 32.

[28] BARONIO G., Berra M., Bertolini L., and Pastore T. A. (1996) Steel corrosion monitoring in normal and total lightweight concrete exposed to chloride and sulfate solutions, Part II : Polarization resistance measurements *Cement and Concrete Research* 26 (5) (1996).

[29] OSBORNE B. J. and Al-Khaiat H. (1995) Durability of lightweight aggregate concrete after 10 years in marine and acid environments *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Sandefjord, Norway (1995).